



공업용수 공급시스템의 효율적인 운영을 위한 시스템다이내믹스 모형의 개발 Development of a System Dynamics Computer Model for Efficient Operations of an Industrial Water Supply System

김봉재¹ · 박수완^{2*} · 김태영³ · 전대훈⁴

Bong-Jae Kim¹ · Su wan Park^{2*} · Tae-yeong Kim³ · Dae-hun Jeon⁴

1 K-Water(한국수자원공사) 울산권관리단 · 2 부산대학교 사회환경시스템공학부 · 3 정수기술단 ·
4 부산대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

(2012년 3월5일 접수; 2012년 5월18일 수정; 2012년 5월23일 채택)

Abstract

In this study, a System Dynamics (SD) simulation model for the efficient operations of an industrial water supply system was developed by investigating the feedback loop mechanisms involved in the operations of the system. The system was modeled so that as demand is determined the water supply quantity of intake pumping stations and dams are allocated. The main feedback loop showed that many variables such as the combinations of pump operation, unit electric power(kWh/m³), unit electric power costs(won/m³), water level of water way tunnel, suction pressure and discharge of pumping station, and tank and service reservoir water level had causal effects and produced results depending on their causal relationship. The configurations of the model included an intake pumping station model, water way tunnel model, pumping station model (including the tank and service reservoir water level control model), and unit electric power model. The model was verified using the data from the case study industrial water supply system that consisted of a water treatment plant, two pumping stations and four dams with an annual energy costs of 5 billion won. It was shown that the electric power costs could have been saved 7~26% during the past six years if the operations had been based on the findings of this study.

Key words : Causal Relationship, Efficient Operation, Feedback Loop, Simulation, System Dynamics, Water Supply System

주제어: 인과관계, 효율적 운영, 피드백 루프, 시뮬레이션, 시스템다이내믹스, 물공급시스템

1. 서론

국내의 상수도시스템 운영방식은 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템을 이용하여 관로상의 운영 변수인 유량, 압력, 수위, 펌프 ON/OFF, 전력량 등을 실시간으로 감시하고 제어를 하고 있다. SCADA 시스템은 현장설비의 관측값을 데이터베이스에 보

관하며, 이러한 데이터를 즉각적으로 화면에 표시할 수 있는 기능을 제공하며, HMI(Human Machine Interface)는 운영자가 필요로 하는 실시간 데이터, 알람, 차트, 트렌드, 리포트를 포함한 여러 종류의 데이터를 그래픽으로 제공한다.

그러나 선진화된 상수도시스템 운영을 위해서는 현장설비의 관측값을 감시하고 제어하는 시

*Corresponding author Tel : 051-510-2734, E-mail: swanpark@pusan.ac.kr(S. W. Park)

시스템에서, 운영 방식이 변경될 때마다 운영 변수 간의 인과관계를 분석하고 예측할 수 있는 시뮬레이션 기능이 탑재된 상수도 운영시스템이 요구된다. 이에 적합한 시뮬레이션 모델링 방법론이 시스템다이나믹스인데, 시스템다이나믹스는 현상에 존재하는 순환적 인과관계를 규명하고, 시스템의 개별 구성 요소를 작동시키는 기제들을 정보 혹은 물질의 피드백(feedback) 체계에 따라 연결하여, 개별 인자의 변화가 시스템 내의 다른 구성에 미치는 영향을 파악하는 것이 용이하게 된다. 또한 시스템다이나믹스는 현상의 시간에 따른 변화과정을 시뮬레이션을 통하여 분석하여, 원하는 시스템의 상태를 얻기 위하여 취할 수 있는 정책적 대안을 결정하고자 하는 일련의 과정을 포함하는 과학적 방법론으로 설명될 수 있다.

본 연구에서는 상수도시스템의 운영에 내재된 피드백 메카니즘(feedback mechanism)을 규명하여 상수도시스템의 효율적인 운영을 위한 System Dynamics(SD) 모의 모형(simulation model)을 개발하고, 개발된 모형은 다수의 펌프장과 정수장, 용수댐으로 구성된 대규모 복합시스템으로 연간 에너지비용으로 약 50억원이 소요되는 국내 A시의 공업용수 시스템에 적용하였다. 시스템다이나믹스는 정보의 피드백 구조가 존재하는 시스템의 변화 양상을 연구하기 위해 시스템 구성 성분간의 다이나믹한(시간에 따라 변화하는) 상관관계를 고려하는 시스템적 사고방식(systems thinking)에 기초한 시스템 모의 방법론이다. SD를 이용하면 시스템을 개념적으로 표현하고 이해하기 쉬우며, 시스템에 대한 정량적 및 정성적 모델을 개발할 수 있다. 또한 시스템의 변화양상을 지배하는 시스템 내 정보의 피드백을 규명할 수 있으며, 시스템을 보다 효율적으로 운영할 수 있는 정책을 개발할 수 있다. 시스템다이나믹스의 기본 개념과 활용사례가 잘 기술되어 있는 문헌으로 Hannon and Ruth (1994), Sterman (2000) 및 Ford(1999)가 있다.

시스템다이나믹스(SD) 방법론은 초기에는 기

업의 경영전략 및 조직관리 등에 이용되었으며, 최근에는 공공정책, 공학, 사회과학의 영역 등 광범위하게 적용되고 있다. 수자원 공학문제에 SD를 활용한 사례를 보면, Keyes and Palmer(1993)의 가뭄 대책 연구, Palmer(1998)의 하천유역의 계획 연구, Fletcher(1998)의 지표수 유지관리를 위한 의사결정지원, Simonovic and Fahmy(1999)의 수자원 정책분석, Stave(2000)의 수자원 관리에서 공공기관 참여 연구, Ahmad and Simonovic(2000a)의 홍수 관리 정책의 경제적 및 사회적 영향 분석, Ahmad and Simonovic(2000b)의 홍수 관리 정책 분석, Ahmad and Simonovic(2000c)의 홍수 관리를 위한 저수지 운영, Teegavarapu and Simonovic(2000)의 다목적 저수지의 운영 모델 문제, Simonovic and Li(2003)의 기후변화와 홍수예방시스템 성능 관계 연구 등이 있다.

국내 연구 사례를 들면, 우선 김신걸(2006)의 SD를 이용한 서울특별시의 장래 물 수요예측, 박혜연(2006)의 SD를 이용한 수도사업 성과 예측, 이상은(2006)의 SD를 이용한 부에노스아이레스 수도사업 양여계약사례의 고찰, 윤범석(2007)의 시스템 다이나믹스를 이용한 작은 섬(제주도) 지역 수자원 이용의 지속가능성 평가, 박수완(2010)의 상수도 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정 지원을 위한 시스템다이나믹스 모형의 개발 등이 있다. 이와 같은 연구동향을 보면, 현재까지 SD 방법론을 상수도 시스템의 운영·유지관리와 관련된 문제에 적용한 연구사례는 박혜연(2006), 이상은(2006), 박수완(2010)의 연구가 있기는 하나, 이들은 상수도 서비스 사업의 사업성과에 대해서만 관심을 국한하였다. 박수완(2010)의 연구사례를 살펴보면, 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. 박

수원의 연구는 시스템의 운영 비용에 중점을 두고 있으나 본 연구는 상수도시스템의 물의 양과 흐름을 고려하였으며 물의 수송과정에서 발생하는 추가압장 펌프의 작동, 수로터널, 배수지 및 흡수정 수위 및 전력원단위를 모델링하였다. 국외의 연구에서 상수도시스템의 운영 혹은 유지관리에 시스템다이내믹스를 적용한 사례는 존재하지 않는 것으로 사료된다.

2. 연구대상 시스템과 SD 모델링의 개요

연구대상 지역의 상수도시스템은 1964년에 시설용량 10만^m³/day의 상수도 생산시설을 확보한 후 꾸준히 확장되어, 현재에는 취수장 2개소, 상호 연계된 댐 4개소, 가압장 4개소 및 정수장 1개소가 있으며, 시설용량 약 1,545,000 ^m³/day로 두 계통으로 생활용수와 세 계통으로 공업용수를 810,000^m³/day 공급한다. 시스템 내의 관로의 총길이는 202km로써 강관, 주철관 및 콘크리트관, 터널 등으로 다양하게 구성되어 있으며, 150mm에서 3,500mm의 다양한 관경으로 이루어져 있다. 또한 관로의 매설 경과년수는 5년에서 40년으로 비교적 노후된 관과 그렇지 않은 관로가 다양하게 분포되어 있다. 이와 같이 연구대상 상수도시스템은 매우 다양한 상수도 구성요소와 공급계통을 가지고 있으며, 수원으로부터 수용가에 이르기까지의 경로가 복잡하여 본 연구에서 개발되는 상수도시스템 운영 및 유지관리 방법론과 모형을 적용시켜 운용할 경우 다른 특성을 가지는 상수도시스템에의 적용도 쉽게 이루어질 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 연구대상 지역의 공업용수 공급계통을 대상으로 SD 모형을 구축하였다.

상수도시스템 SD 모형에서 필요한 자료는 모형의 저장 변수(stock variable)에 대한 초기값과 변환자(converter)에 대한 특성값으로 구분할 수 있는데, 이러한 자료는 연구대상 지역 상수도시스템의 과년도 수도통계자료, 수도 GIS 입력자료, SCADA 시스템의 현장설비 관측값 데이터베이스, 수도사업 경영자료, 전력원단위

분석 보고서 등을 이용하여 획득할 수 있다.

모형의 검증과 보정은 연구대상 상수도시스템의 과거 특정 시점을 기준으로 모의를 수행한 후 현재 시점에 대한 모의 결과를 현재 실제 상수도시스템의 여러 가지 운영 및 유지관리 지표와 비교함으로써 이루어진다. 이러한 SD 모의 결과와 실제 상수도시스템의 운영 및 유지관리 지표에 차이가 있을 경우에는 먼저 SD 모형 내 주요 지표의 시간에 따른 변화 양상 - 예를 들어 로지스틱 함수적 증가 양상 - 이 실제 시스템의 변화 양상과 같은지 확인한다. 이러한 두 변화 양상이 같을 경우에는 구축한 SD 모형의 구조가 실제 시스템을 잘 모사하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 모형의 기본 구조는 그대로 유지하되 모형에 사용된 초기값과 특성값 및 계수들에 대한 검사를 통하여 모형을 좀 더 세밀하게 구축한다.

모형과 실제 시스템의 변화 양상이 다르게 나타날 경우에는 모형의 기본 구조가 보완될 필요가 있으므로, 상수도시스템의 운영 및 유지관리의 피드백 메카니즘에 대한 새로운 고찰이 필요하며 모형의 구축과정에서 개념적으로 누락된 부분이 있는지 검사하고 이를 보완한다.

3. 공업용수 관망시스템 시스템다이내믹스 모델의 구축

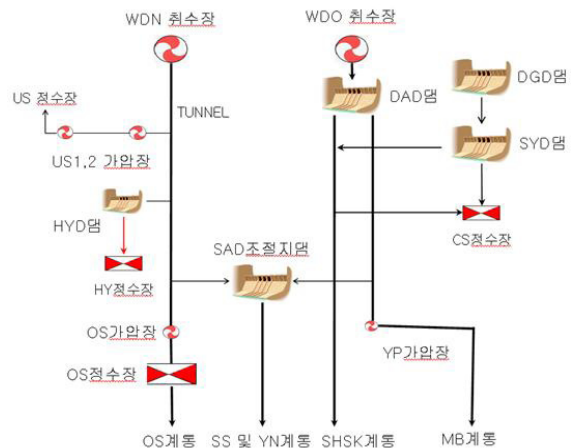
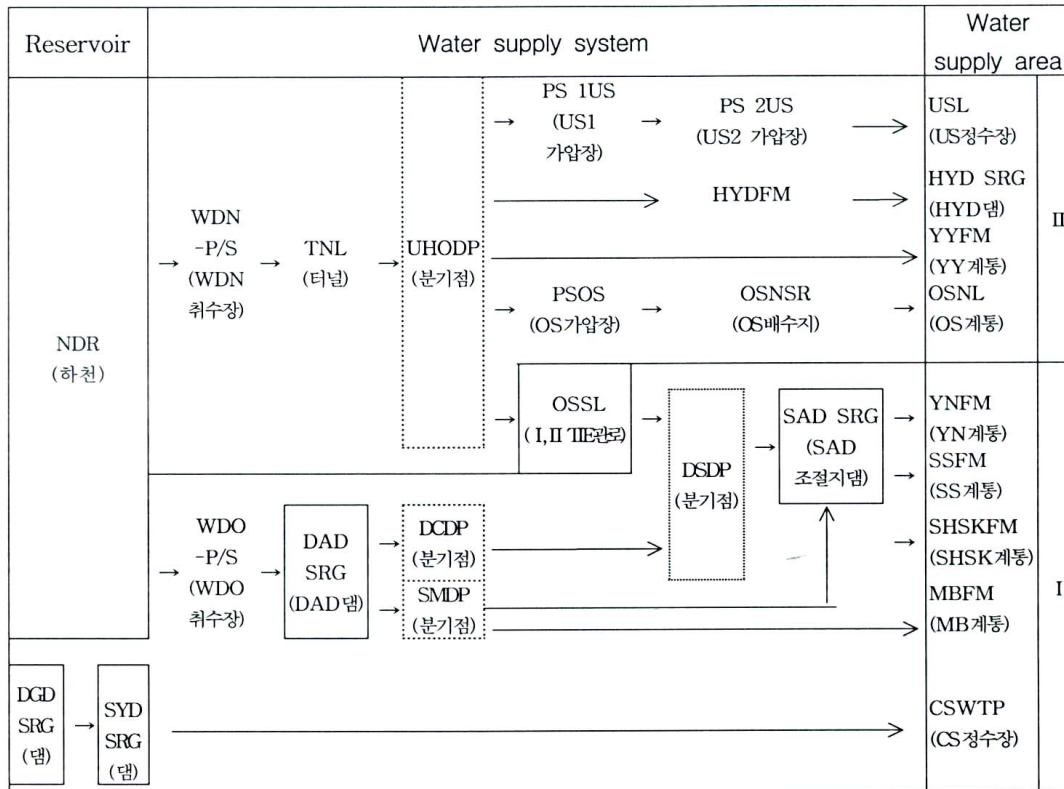


Fig. 1. Schematic diagram of the case study industrial water supply system

Table 1. Summary of the water supply paths



A도시 관망시스템은 Fig. 1과 같이 수원인 하천 및 댐에서 용수를 취수하고, 도송수 및 급배수시설인 취수장, 관로, 터널, 가압장, 정수장을 통하여 급수지역으로 공급한다.

Fig. 1의 관망도를 용수 공급 시기 및 지역에 따라 I, II 단계로 나누고 세부적인 공급경로는 Table 1과 같이 도표로 나타내었다.

I 단계는 수원인 하천과 용수댐에서 취수장, 관로, 조절지댐을 통해 급수지역으로 공급하고, II 단계는 수원인 하천에서 취수장, 터널, 가압장, 정수장, 관로를 거쳐 급수지역으로 공급된다. I, II 단계는 TIE관로(OSSL)로 연결되어 있다. 따라서 이 관망시스템에서 가장 긴 물 공급 경로는 하천 → 취수장 → 관로(터널) → 용수댐 → 관로(터널) → 가압장 → 정수장 → 급수지역 이다.

3.1 연구대상 시스템의 작동기제

시스템다이나믹스 모델링 방법론에 입각하여 A공업용수 관망시스템 운영 모델을 작동시키는 기제(mechanism)는 수원으로부터 급수지역으로 이송되는 물의 흐름이다. 여기서 수원으로부터 취수된 물은 터널, 댐 등을 거쳐 급수지역으로 이동하는 일방향 흐름을 가진다. 그러나 본 용수공급 시스템의 운영에 내재된 구성요소들 간의 관계를 나타내는 인과지도(causal diagram)는 Fig. 2와 같으며 총 10개 이상의 피드백 루프 인과관계가 발생하는 특징을 가진다.

인과지도를 보면, 이 시스템의 출발점인 취수 펌프장은 WDO 및 WDN 취수펌프장으로 구분되며 WDO 취수량은 댐을 거치고, WDN 취수량은 UHODP터널을 거쳐 급수지역으로 공급된다. 따라서 공급량은 WDN 취수량과 댐공급량

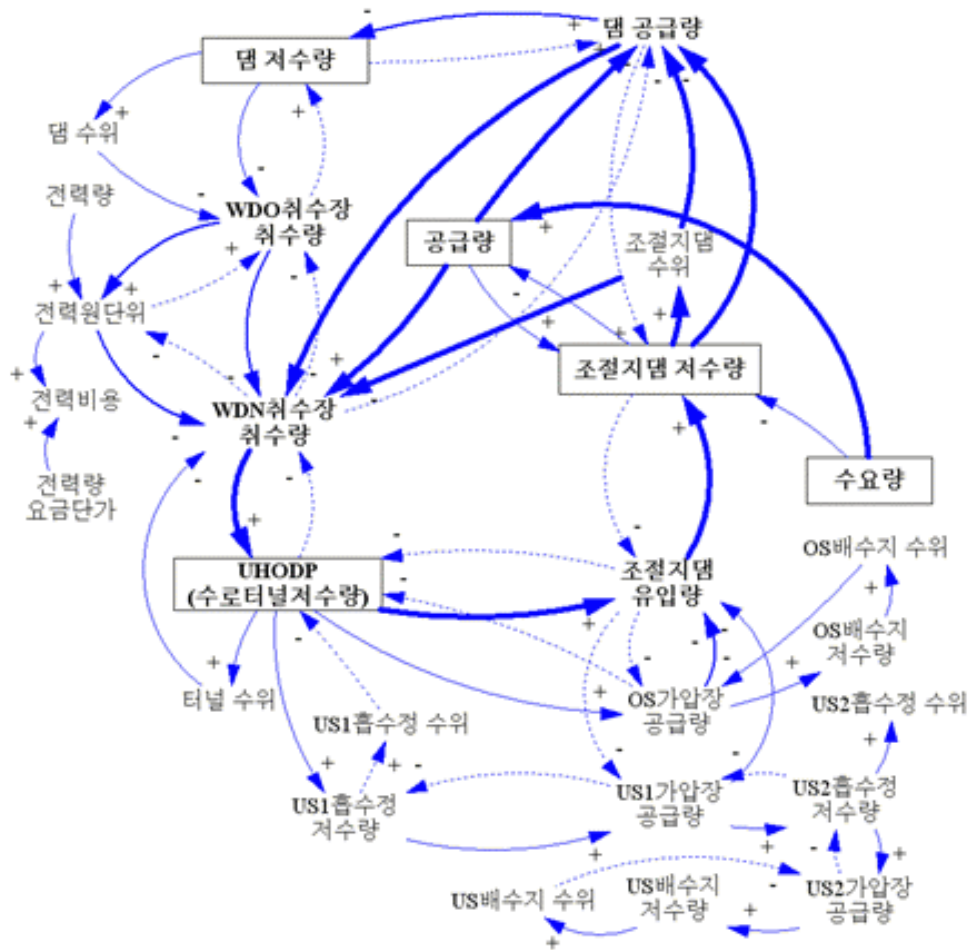


Fig. 2. Causal diagram of the system dynamics model

의 합이며 수요량과 운영상황에 따라 WDN 취수량과 댐 공급량 각각의 수량은 탄력적으로 제어된다.

인과지도에서 가장 주된 루프를 가지는 피드백은 공급량이 수요량보다 작을 경우 부족한 공급량은 조절지댐에서 공급하게되어 조절지댐 저수량이 감소한다. 반대로 클 경우에는 조절지댐 저수량이 증가하는 경우이다. 인과관계를 살펴보면, 수요량이 증가하는 경우 공급량을 증가시키기 위해서 WDN 취수량 또는 댐공급량을 증가시키거나, WDN 취수량과 댐 공급량 모두를 증가시켜야 한다. Fig. 2의 굵은 화살표와 같이

WDN 취수량을 증가시키는 경우에는 수로터널 저수량이 증가하게 되고 수로터널 저수량 증가로 인해 조절지댐 유입량이 증가하게 되어 조절지댐 저수량이 증가한다. 조절지댐 저수량 증가로 인해 조절지댐 수위가 운영 상한수위에 도달할 경우 수위 상승을 제어하기 위하여 WDN 취수량 또는 댐 공급량을 감소시켜야한다. 만일 WDN 취수량 증가→수로터널 저수량 증가→조절지댐 유입량 증가→조절지댐 저수량 증가→WDN 취수량 감소로 이어지는 음의 피드백이 지배한다면 WDN 취수량이 평형에 도달하는 형태를 보일 것이고, 반대로 WDN 취수량 증가→수로터

널 저수량 증가→조절지댐 유입량 증가→조절지댐 저수량 증가→댐 공급량 감소→댐 저수량 증가→WDO 취수량 감소→WDN 취수량 증가로 이어지는 양의 피드백 루프가 지배적이면 WDN 취수량 증가라는 형태를 보이게 된다. 따라서 이 피드백에서는 양과 음의 피드백 간의 상호 작용으로 WDN 취수량이 적절하게 제어된다.

반대로 댐 공급량과 연관된 피드백은 다음과 같다. Fig. 2의 점선 화살표와 같이 댐 공급량을 증가시키는 경우에는 조절지댐 저수량 증가로 인해 조절지댐 수위가 운영 상한수위에 도달하게 되어 댐 공급량 또는 조절지댐 유입량을 감소시켜야 한다. 만일 댐 공급량 증가→조절지댐 저수량 증가→댐 공급량이 평형에 도달하는 음의 피드백이 지배한다면 댐 공급량 감소라는 형태를 보일 것이고, 반대로 댐 공급량 증가→조절지댐 저수량 증가→조절지댐 유입량 감소→수로터널 저수량 증가→WDN 취수량 감소→WDO 취수량 증가→댐 저수량 증가→댐 공급량 증가로 이어지는 양의 피드백 루프가 지배적이면 댐 공급량 증가라는 형태를 보이게 된다. 따라서 이 피드백 또한 양과 음의 피드백 간의 상호 작용으로 댐 공급량이 적절하게 제어된다.

주 루프를 가지는 피드백에서 파생하는 피드백을 살펴보면, 가압장의 경우에는 WDN 취수량을 증가시켜 수로터널 저수량이 증가하게 되어 터널 수위가 상승하게 되면 가압장 흡입수두가 상승하여 가압장 토출량이 증가하게 된다. 가압장 토출량이 증가하게 되면 가압장에서 공급되는 흡수정, 배수지의 저수량이 증가로 인해 운영 상한수위에 도달하게 되어 가압장 토출량을 감소시켜야 한다. 가압장 토출량을 감소하면 수로터널 저수량이 증가하여 WDN 취수량을 감소시켜야 하는 음의 피드백이 발생한다.

또한 물 1m³를 양수하는데 소요되는 전력량(kWh)을 나타내는 전력원단위(kWh/m³) 피드백의 경우에는 WDN 취수장이 WDO 취수장보다 상대적으로 전력원단위가 낮으므로, WDN 취수량을 증가시킬수록 전력비용이 감소하게 된다. 따라서 WDN 취수량을 증가시키면 WDO 취수

량을 감소시키게 되고, WDO 취수량이 감소하면 전력원단위가 낮아지며, 전력원단위를 낮아지게 하기 위해서는 WDN 취수량을 증가시켜야 하는 양의 피드백이 발생하게 된다. 그러나 WDN 취수량을 증가시킬 경우 수로터널 저수량 증가로 인해 터널 수위가 지속적으로 상승하게 된다. 따라서 수로터널 운영 상한수위 이상으로 상승하기 전에 WDN 취수량을 감소시켜야 하는 음의 피드백이 발생하여 터널 수위를 제어하는 피드백이 존재한다. 한편 WDO 취수량을 감소시킬 경우 댐 저수량 감소로 인해 댐 수위가 지속적으로 하강하게 된다. 따라서 댐 운영 하한 수위 이하로 하강하기 전에 WDO 취수량을 증가시켜야 하는 음의 피드백이 발생한다.

이상과 같은 본 시스템의 작동기제를 요약하면, 본 시스템은 물 공급원인 WDN 취수량과 댐 공급량간 피드백, WDN 취수량 및 댐공급량과 가압장(흡수정 및 배수지 수위)간 피드백, WDN 취수량 및 댐공급량과 전력원단위간의 피드백이 존재하며, 이러한 피드백들 간의 상호 작용으로 적절한 운영 방식이 결정되는 시스템이다. 본 연구에서는 이러한 시스템의 피드백 메카니즘을 모형화하고 시스템다이나믹스 모델링용 소프트웨어인 STELLA를 이용하여 시뮬레이션하였다. STELLA는 자료의 수정 및 갱신이 용이하고, 모형을 시각적으로 구축할 수 있어 누구나 모형의 숙지 및 운용을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. STELLA에 관한 기술적 내용은 High Performance Systems, Inc. (HPS 1993)에 잘 수록되어 있다. 또한 Hannon and Ruth (1994)은 STELLA의 활용성에 대해 잘 설명하고 있다. Fig. 3는 Fig. 2과 같은 인과지도를 기반으로 A 도시 공업용수 관망시스템을 시스템다이나믹스 모델링 프로그램인 STELLA를 이용하여 모델링한 결과를 Stock & Flow Diagram 형식으로 나타낸 것이다.

각 모델 구성요소인 수원인 댐, 하천 및 유량(관로) 분기점, 합류점은 stock(□), 유량(관로)의 흐름은 flow(→), 변수는 converter(○), 관계되는 모델 요소들 간의 연결은 action connector

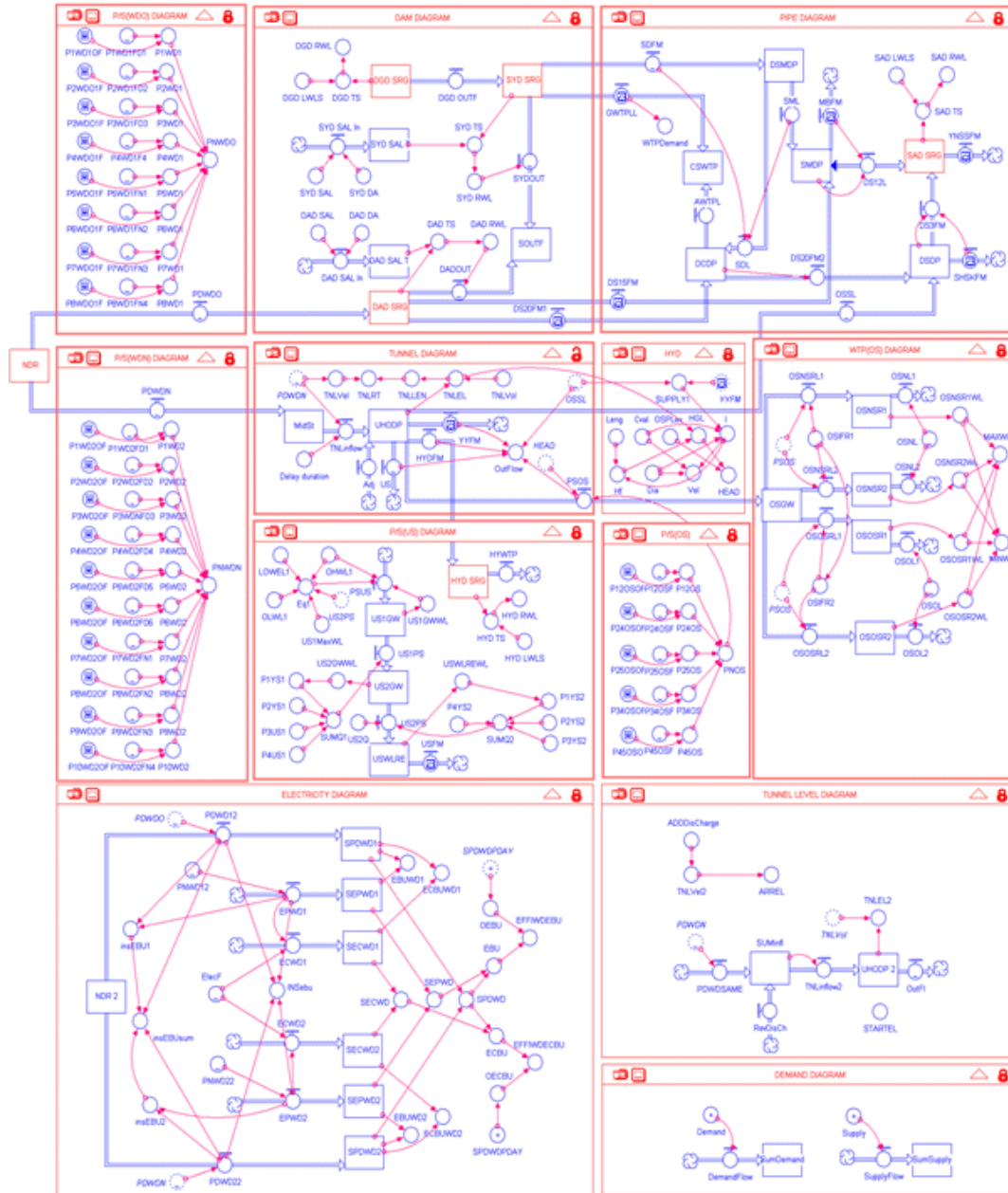


Fig. 3. Stock and Flow Diagram of the System Dynamics Model

(A)로 구성하였다. 본 모델링을 바탕으로 현장의 다양한 관망 운영 시나리오를 시뮬레이션 하였으며, 관측값과 모의값의 오차가 최소화 되도록 검, 보정 작업을 수행하여 시스템다내믹스 모델링의 신뢰도를 높였다. 본 연구에서 개발된

모형은 가장 긴 물 공급 경로인 하천 → 취수장 → 관로(터널) → 용수댐 → 관로(터널) → 가압장 → 정수장 → 급수지역을 감안하여 취수장 모델(용수댐 수위 포함), 터널 모델, 가압장 모델(흡수정 및 착수정, 정수장 배수지 수위 포함)를

기본으로하고, 수도사업장 운영에서 가장 큰 경비를 차지하는 전력비용 변수를 모의하기 위하여 전력원단위 모델을 추가하여 구성하였다. 수원인 하천은 수도운영에 미치는 영향이 미비하여 모델 구성에서는 제외하였다.

3.2 취수펌프장, 수로터널 및 가압장 모델의 구축 및 분석

취수장 모델에서는 I 단계로 공급하는 WDO 취수장과 II 단계로 공급하는 WDN취수장이 있으며, WDO취수장의 펌프 최대 가동 대수는 6대이며 일평균 250,000m³을 공급하고, WDN취수장의 펌프 최대 가동 대수는 7대이며 일평균 470,000m³을 공급한다. 따라서 WDO 및 WDN 취수장의 펌프 조합으로 일평균 720,000m³을

공급하고 있다.

본 모델에서는 WDO 및 WDN취수장 각각의 펌프 운전 상태(ON/OFF), 펌프 조합별 취수량, 취수량에 따른 전력원단위, 전력비용원단위를 분석하고 모델을 구성하였다. 시간대별 전력량 요금단가는 주간시간대인 09:00~18:00에는 65.40won/kWh, 야간시간대인 18:00~23:00에는 79.00won/kWh, 심야시간대인 23:00~09:00에는 35.90won/kWh이며, 심야(late-night)시간대가 주야간(day and night)보다 45~55% 저렴한 경우이다. 취수장의 취수량별 펌프 전력 및 전력원단위는 Table 2와 같으며 실측값을 사용하였다. PON는 취수펌프장의 펌프 가동 대수, PD는 시간당 취수량(m³/hr), EP는 동력(kW), UEP는 전력원단위(kWh/m³)를 나타낸

Table 2. EP and UEP according to discharge

Pump operating Number (PON)	WDO Intake pumping station			WDN Intake pumping station		
	(PON)discharge (PD, m ³ /hr)	electric power (EP,kW)	unit electric power (UEP,kWh/m ³)	discharge (PD, m ³ /hr)	electric Power (EP, kW)	unit electric power (UEP, kWh/m ³)
1	3,620	1,150	0.318	5,070	1,150	0.227
2	6,990	2,330	0.333	10,200	2,350	0.230
3	10,270	3,590	0.348	14,300	3,440	0.241
4	12,700	4,480	0.353	18,050	4,500	0.249
5	14,190	5,060	0.356	21,750	5,570	0.256
6	16,600	5,940	0.358	25,200	6,530	0.259
7				28,500	7,630	0.268

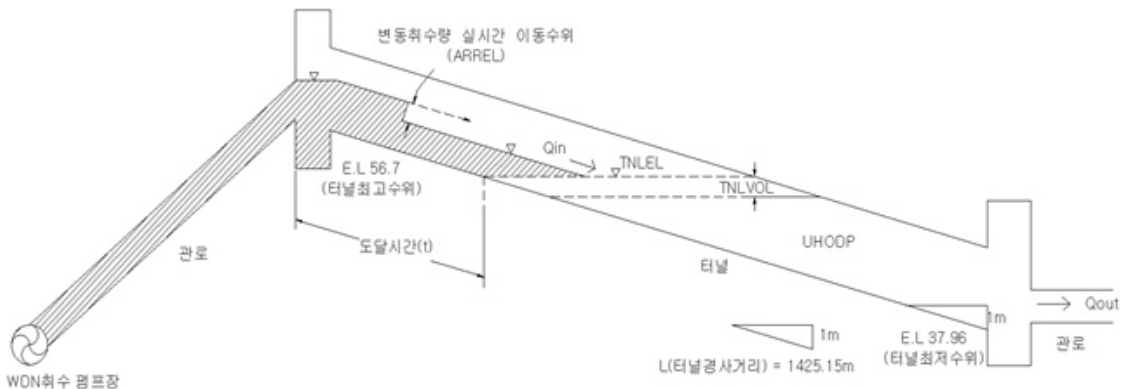


Fig. 4. Flow diagram of water way tunnel

다.

수로터널은 취수펌프장에서 취수한 용수를 이송하는 도수터널로서, 제원은 직경 3.0~3.5m, 길이 25km이다. Fig. 4와 같이 취수한 용수는 관로를 통해 터널 입구부에서 터널 수위(TNLEL)까지 도달한 후 터널 출구부 관로를 통하여 급수지역으로 용수를 공급한다. 따라서 수로터널은 시스템 내 물 이송과정에서 터널 유입, 유출 사이에 상당한 시간적 지연이 발생하므로 터널수위의 실시간 예측을 위해서는 터널 유입량이 터널 수위에 도달하는 시간을 산정할 필요가 있다. 터널 수위는 취수장 펌프 운영 대수 조정 등 관망시스템 운영상 주요한 관리 변수이므로 터널내 용수의 이송 과정을 Fig. 4와 같이 모형화하여 터널 내 수위를 실시간으로 예측할 수 있는 모형을 개발 하였다.

취수한 물이 터널 수위에 도달하는 시간은 취수한 물이 터널 내부에서 이동한 위치와 터널수위와 만나는데 소요되는 시간이다. 따라서 변동된 취수량이 이동한 위치를 수위로 환산하고, 이동한 수위와 터널수위가 같아질 때 까지 지연된 시간을 도달시간으로 산정하였다. 변동된 취수량이 터널 수위에 영향을 미치는 시간은 이러한 도달시간 후인 것으로 모델링 하였다. 모형에서 터널 수위는 Eq. (1)을 이용하여 산정하였다. ARREL(EL,m)은 변동된 취수량이 t 시간 이후에 이동한 위치를 수위로 환산한 값이며 Eq. (2)와 같다.

$$TNLEL = UHODP/TNLVol+37.96 = UHODP/(108.8 \times 100)+37.96 \quad (1)$$

$$ARREL = 56.7 - (TNLVol \times 3,600/1425.15) \times t \quad (2)$$

Eq. (1)과 (2)에서 37.96, 56.7은 수로터널의 최저 및 최고 수위(EL,m)이며, 1425.15값은 터널 높이 1m당 터널 경사거리(m)를 나타낸다. TNLEL(EL,m)는 터널수위, TNLVol는 수로터널 단위높이당 수량(108.8m³/cm), UHODP는 수로터널내 저류량(m³)이며 TNLVel는 취수 유량

별 터널내 유속(m/s) 이다.

UHODP는 터널 유입량과 유출량 차 ($\pm \Delta S = Q_{in} - Q_{out}$)의 누계로 인한 터널내 저류량이며, 저류량이 증가(+ ΔS)할 경우 터널수위는 상승하고, 저류량이 감소(- ΔS)할 경우 터널수위는 하강한다. 수로터널 단위높이당 수량은 터널의 평균직경 3.119m를 구하고 터널 높이가 1cm당 체적을 계산한 결과 108.8m³으로 나타났다.

취수장의 취수 유량별 터널내 실제 유속를 구하기 위하여 40여개의 취수량과 터널에 설치된 수위계를 분석하여 취수량이 터널 자유수면에 도달하는 시간과 그 시점에서의 도달거리로부터 터널내 유속을 구하였다. 취수 유량과 유속값을 회귀분석한 결과 관계식은 Eq. (3)과 같다.

$$TNLVel = -2.5243 \times 10^{-9} Q^2 + 0.0001627 Q + 0.1058 \quad (3)$$

Eq.(3)에서 TNLVel은 터널내 실제 유속(m/s)이며 Q는 취수량(m³/hr)이다.

가압장은 WDN취수펌프장에서 취수한 용수를 가압하여 급수지역으로 공급하는 시설물로서, US가압장과 OS가압장이 있다. US가압장의 용수 공급 시스템은 흡수정을 거쳐서 가압하는 방식이며 US1흡수정→US1가압장→US2흡수정→US2가압장→급수지역 순서로 구성된다. OS가압장의 용수 공급 시스템은 관로상의 흡입수두를 이용하는 인라인 가압 방식이며 OS가압장→정수장 배수지→급수지역 순으로 구성된다. OS가압장의 흡입수두에 따른 펌프조합별 가압

Table 3. Discharge(Q) according to pump combination and water head of suction pressure(H)

Pump combination	Discharge(Q)
1,2 호기	$Q_{1,2} = 175.21 \times H + 2,736$
2,4 호기	$Q_{2,4} = 163.36 \times H + 4,481$
2,5 호기	$Q_{2,5} = 209.69 \times H + 1,690$
3,4 호기	$Q_{3,4} = 82.404 \times H + 6,556$
4,5 호기	$Q_{4,5} = 2,328.6 \times H - 68,265$

장 토출량 관계는 Table 3와 같으며 H는 흡입수두이며 단위는 EL.m이다. 흡수정과 배수지의 수위 제어는 운영 하한 및 상한수위에서 펌프 대수 또는 마력이 조정되도록 모델링하여 목표로 하는 수위내에서 운영이 되도록 하였다.

4. 모델의 검증

본 연구에서 개발한 SD모형을 검증하기 위하여 펌프 가동대수 변화가 있는 2일간을 대상으로 모의 운영을 실시하였다. WDO취수장 2~3대(7,000~10,000m³/hr), WDN취수장 3~4대(15,000~20,000m³/hr) 가동할 때 취수장 전력원단위, 터널 수위, 가압장 흡입수두 및 토출량, 흡수정과 배수지 수위의 모의값과 관측값을 비교하고 검증하였다.

우선 취수장 모델에서 취수장 펌프 조합 운전 에 따른 전력원단위를 검증하기 위하여 WDO 및 WDN취수장 각각의 전력원단위를 구하고 두 취수장의 취수량에 따른 전력원단위를 모의하였다. Fig. 5는 모의값과 관측값을 비교한 그래프이며 관측값과 모의값의 차이의 제곱의 합(R²)이 0.9911로 나타나 모의결과가 관측값과 매우 유사한 것으로 나타났다.

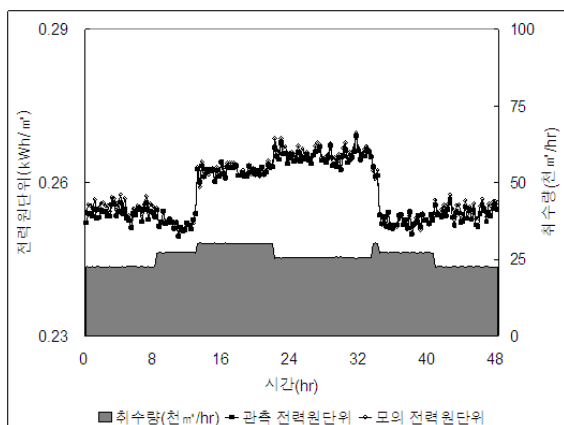


Fig. 5. Observation and simulation of discharge-UEP

수로터널 모델에서 수로터널 예측 수위를 검증하기 위하여 WDN취수장 취수량이 터널 수위에 도달하는 시간을 시뮬레이션한 결과 Fig. 6과 같이 2.03hr으로 나타났으며, 도달시간

2.03hr을 적용하고 터널수위를 시뮬레이션한 결과 Fig. 7과 같이 관측 터널수위와 모의 터널수위가 R²=0.7547으로 비교적 유사한 것으로 나타났다.

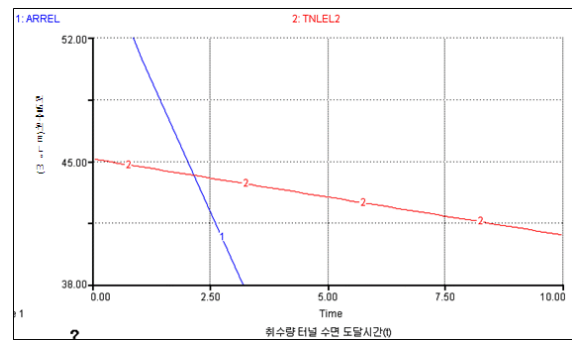


Fig. 6. Arrival time(t) of discharge to water surface level of water way tunnel

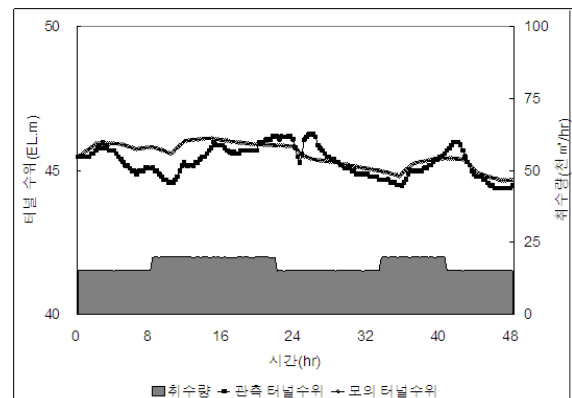


Fig. 7. Observation and simulation of water surface level of water way tunnel

가압장 모델에서 터널 수위 OS가압장 흡입수두 및 토출량 검증을 위하여 흡입수두에 따른 펌프조합별 가압장 토출량 관계를 시뮬레이션한 결과 Fig. 8과 같이 관측 흡입수두와 모의

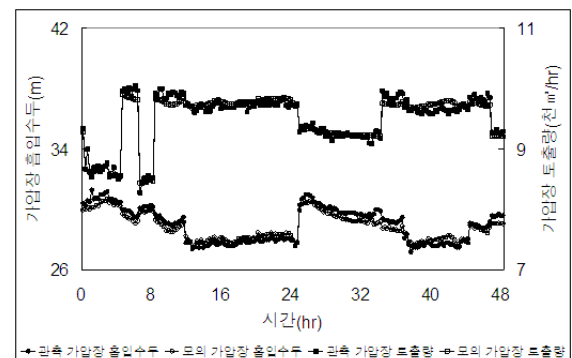


Fig. 8. Observation and simulation of water head of suction pressure(H)-discharge

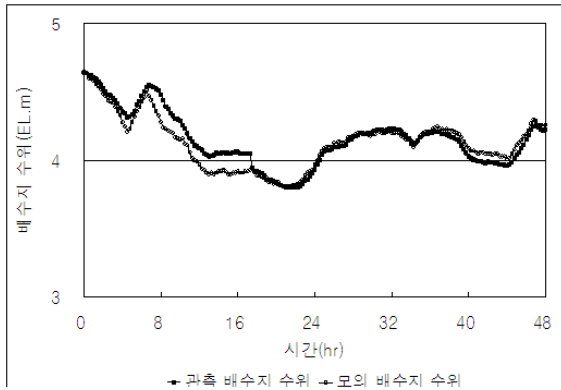


Fig. 9. Observation and simulation of water surface level of service reservoir

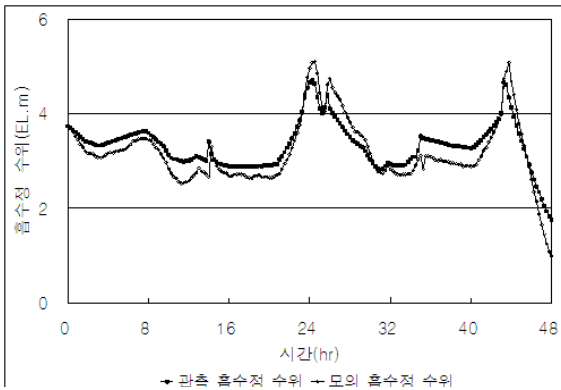


Fig. 10. Observation and simulation of water surface level of water tank

흡입수두는 $R^2=0.9730$, 관측 토출량과 모의 토출량은 $R^2=0.9757$ 으로 매우 유사한 것으로 나타났다.

가압장 펌프 가동에 따른 배수지 및 흡수정의 예측 수위를 검증하기 위하여 OS 및 US가압장 펌프 가동에 따른 OS정수장 배수지 수위와 US가압장 흡수정(water tank) 수위를 시뮬레이션한 결과 각각 $R^2=0.9380$, $R^2=0.9512$ 으로 Fig. 9, 10과 같이 관측 수위와 모의 수위가 매우 유사한 것으로 나타났다.

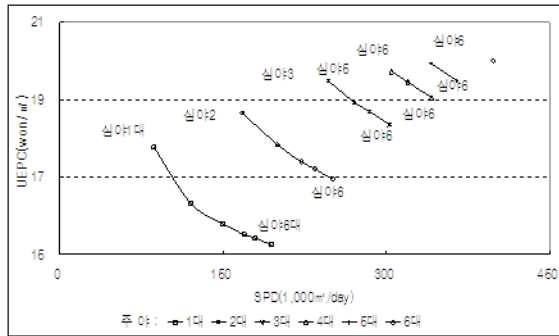
5. 모델의 활용 방안

본 연구에서 개발한 모형의 활용 방안을 제시하기 위하여 펌프 가동시간대에 따라 다른 전력요금제가 적용될 경우를 가정하였으며, 그에 따른 전력원단위 모델을 구축하고 모의를 시행하였다. 우선적으로 3.2에서 구축된 각각의 WDO과 WDN취수펌프장 모델을 시뮬레이션한 결과를 보면, 펌프조합에 따른 취수량, 전력원단위 및 전력비용원단위는 Table 4 및 Fig. 11와 같

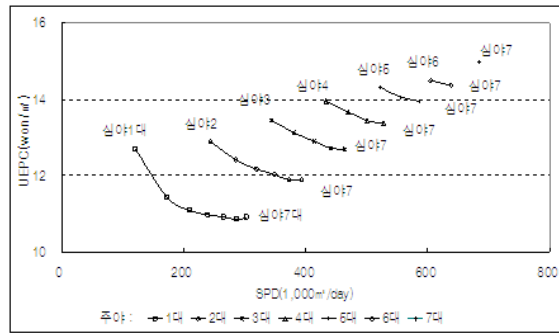
Table 4. SPD, UEP and UEPC according to pump combination

PON		WDO Intake pumping station						WDN Intake pumping station						
late-night		1대	2대	3대	4대	5대	6대	1대	2대	3대	4대	5대	6대	7대
day and night														
1대	86,880	120,580	150,100	169,540	179,970	194,430	121,680	172,980	209,880	239,880	265,780	286,480	302,980	
	0.318	0.324	0.330	0.331	0.332	0.333	0.227	0.228	0.232	0.235	0.237	0.238	0.240	
	17.77	16.32	15.80	15.51	15.42	15.25	12.69	11.42	11.09	10.97	10.91	10.85	10.91	
2대		167,760	200,560	222,430	234,350	251,220		244,800	285,800	319,550	349,150	373,300	393,100	
		0.333	0.340	0.341	0.342	0.343		0.230	0.235	0.238	0.240	0.241	0.243	
		18.65	17.83	17.39	17.21	16.94		12.89	12.41	12.17	12.02	11.89	11.89	
3대			246,480	270,780	284,190	303,470			343,200	380,700	414,000	441,600	464,700	
			0.348	0.350	0.352	0.352			0.241	0.244	0.247	0.248	0.250	
			19.49	18.94	18.70	18.35			13.46	13.13	12.91	12.73	12.69	
4대				304,800	319,700	341,390				433,200	470,200	501,250	527,650	
				0.353	0.354	0.355				0.249	0.252	0.253	0.256	
				19.73	19.46	19.06				13.95	13.67	13.44	13.36	
5대					340,560	364,660					522,000	556,500	586,200	
					0.356	0.357					0.256	0.257	0.261	
					19.94	19.49					14.33	14.06	13.95	
6대						398,400						604,800	637,800	
						0.358						0.259	0.263	
						20.02						14.50	14.37	
7대													684,000	
													0.268	
													14.98	

다. SPD는 일일 취수량(m^3/day), UEPC는 물 $1m^3$ 를 양수하는데 소요되는 전력비용을 나타내며, 이하 전력비용원단위(won/m^3)로 표기하였다.



(a) WDO Intake pumping station



(b) WDN Intake pumping station(수정)

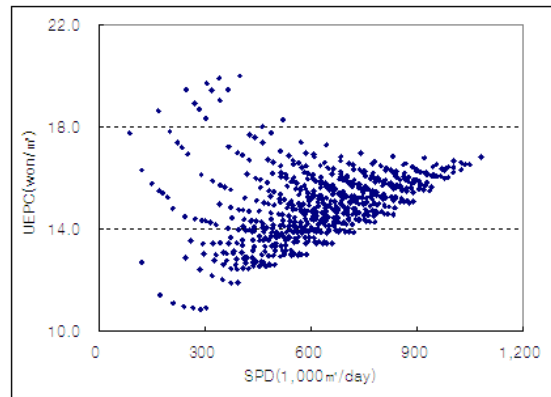
Fig. 11. UEPC according to pump combination

펌프 가동 대수는 심야시간대가 주야간시간대보다 많거나 같은데, 이유는 전력량 요금단가가 주야간시간대보다 심야시간대가 낮기 때문이다. 따라서 펌프가동 대수 조합에 따른 시뮬레이션은 심야시간대 펌프 가동 대수가 주야간시간대보다 많거나 같은 경우에만 시행하였다.

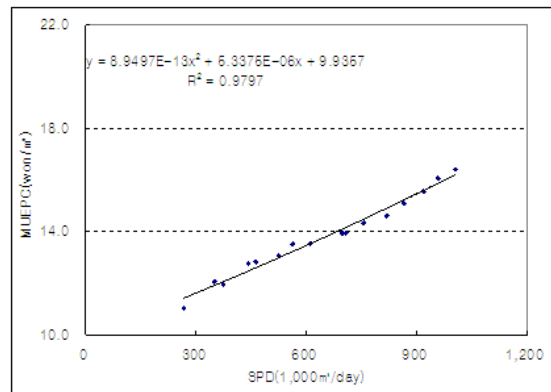
Table 4을 보면, WDO취수펌프장의 경우 취수량은 $86,880 \sim 398,400 m^3$, 전력원단위는 $0.3177 \sim 0.3578 kWh/m^3$, 전력비용원단위는 $15.250 \sim 20.018 won/m^3$ 이며, 펌프 가동 주야간 1대, 심야 6대 일때 전력비용이 최저가 되고, 주야간 6대, 심야 6대 일때 최대가 된다. WDN취수 펌프장의 경우에는 취수량은 $121,680 \sim 684,000 m^3$, 전력원단위는 $0.2268 \sim 0.2677 kWh/m^3$, 전력비용원단위는 $10.846 \sim 14.977 won/m^3$ 이며, 펌프 가동 주야간 1대, 심야 6대일 때 전력비용

이 최저가 되고 주야간 7대, 심야 7대일 때 최대가 된다. WDO와 WDN취수장을 비교해 보면, 전력원단위는 Fig. 11과 같이 WDN취수장이 WDO취수장 보다 약 45% 낮게 나타났다. 전력비용원단위는 WDO취수장의 경우 주야간 펌프 가동대수에 관계없이 심야에 최대인 6대 가동할때 최소인 것으로 나타났으며, WDN취수장은 주야간 펌프를 1,2대 가동할때는 심야 6대, 주야간 펌프를 3, 4, 5, 6대 가동할때는 심야 7대일 때 최소인 것으로 나타났다. 따라서 취수펌프장 취수량 계획 수립시 WDN취수펌프장을 주야간 가동대수에 따라 심야에 6 또는 7대 가동하고, 부족한 물량은 WDO취수펌프장에서 취수하면 펌프를 주야간, 심야시간대에 동일하게 가동할 경우에 비하여 전력비용을 13%까지 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

WDO 및 WDN취수펌프장 각각의 취수량, 전력원단위, 전력비용원단위를 조합한 시뮬레이션



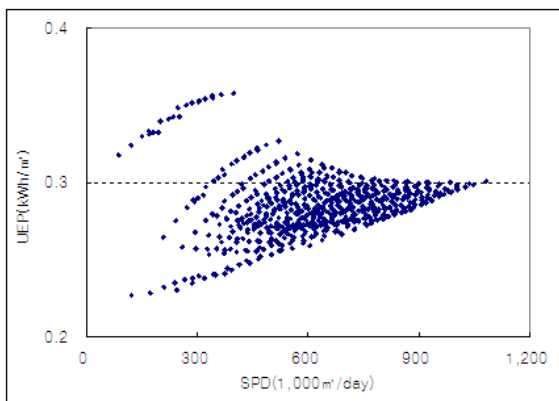
(a) Unit electric power cost(UEPC)



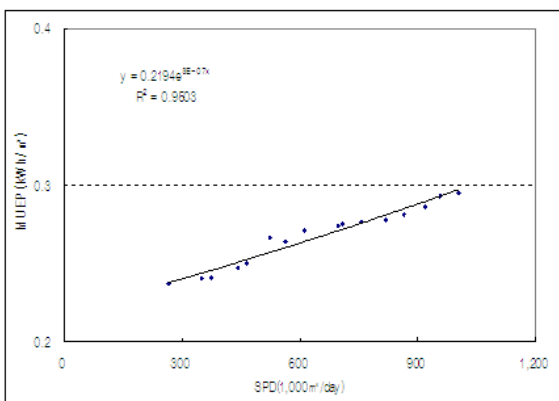
(b) Minimum unit electric power cost(MUEPC)

Fig. 12. UEPC and MUEPC according to discharge

결과를 보면, WDO취수펌프장 21가지 펌프 조합의 수와 WDN취수펌프장 28가지 펌프 조합의 수를 조합한 637가지의 취수량에 따른 전력원단위, 전력비용원단위는 Fig. 12(a), Fig. 13(a)와 같으며, 취수량은 일일 86,880~1,082,400m³, 전력원단위는 0.2268~0.3578kWh/m³, 전력비용원단위는 10.997~20.018won/m³으로 나타났다. Fig. 12(a), Fig. 13(a)에서 취수량에 대해 가장 작은 값을 가지는 전력원단위(MUEP) 및 전력비용원단위(MUEPC)값 들만을 나타내면 Fig. 12(b), Fig. 13(b)와 같고 이러한 자료에 가장 적합한 함수형을 구하면 Eq. (4) 및 (5)와 같다.



(a) Unit electric power(UEP)



(b) Minimum unit electric power(MUEP)

Fig. 13. UEP and MUEP according to discharge

$$MUEPC = 8.9497 \times 10^{-13} SPD^2 + 5.3375 \times 10^{-6} SPD + 9.9357 \quad (4)$$

$$MUEP = 0.2194e^{(8 \times 10^{-7} SPD)} \quad (5)$$

최소전력비용원단위(MUEPC)와 최소전력원단위(MUEP)는 일평균 취수량을 취수할 수 있는 최소의 전력비용원단위와 전력원단위를 의미한다.

따라서 수도운영자는 취수펌프장 운영 정책과 관련된 취수량, 전력량 요금단가, 터널 및 댐 운영 수위 등의 변수가 변경되거나 제약조건이 발생할 경우 본 연구에서 개발한 전력원단위 모델을 시뮬레이션하고, 변경된 변수나 제약조건이 반영된 효율적인 펌프 조합을 도출하여 전력원단위를 최소로 운영 할 수 있다. 또한 전력원단위 및 전력비용원단위 분석을 통해 펌프 특성을 알 수 있으며, 향후 본 모델에 다양한 전력요금제와 펌프 운영방식을 조합하여 수도운영자가 효율적인 취수장 운영정책 수립시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 연구에서는 상수도시스템 구성 요소 전반인 취수장, 수로터널, 가압장, 흡수정 및 배수지 수위, 전력원단위에 대해 시스템다이내믹스 모델링 방법론을 적용하였다. 이를 통해 물흐름과 다양한 운영상황 모의를 실시하여 효율적인 수도운영이 가능하도록 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 취수펌프장 모델에서는 WDO 및 WDN취수 펌프장 각각의 펌프 운전 상태(ON/OFF) 및 펌프 조합별 취수량, 취수량에 따른 전력원단위 및 전력비용원단위를 분석하였다. 전력원단위 모델에서는 취수펌프장 모델에서 도출된 WDO 및 WDN취수펌프장 각각의 취수량, 전력원단위, 전력비용원단위를 조합한 모델링을 구축하여 효율적인 펌프 조합 운영이 가능하도록 하였다.
- 2) 수로터널 모델링에서는 터널 수위의 정밀한 예측을 통한 제어를 위하여 터널 수위에 영향을 미치는 터널 유입량이 터널 수위에 도달하는 시간 등을 과년도 실제 운영자료를 이용하여 분석하고 모델링함으로써 터널 수위 예측값의 신뢰도를 높였으며, 터널 수위

예측 운영이 가능하도록 하였다. 수로터널 수위 예측 모형을 검증한 결과 $R^2=0.7547$ 으로 관측 터널수위와 모의 터널 수위가 유사한 것으로 나타났다.

- 가압장 모델링은 OS가압장 흡입수두에 따른 펌프조합별 토출량 관계를 시뮬레이션한 결과 관측 흡입수두와 모의 흡입수두가 상당히 유사한 것으로 나타났다. 또한 가압장 펌프 가동에 따른 정수장 배수지 및 흡수정 수위를 시뮬레이션한 결과 관측 배수지 및 흡수정 수위와 모의 배수지 및 흡수정 수위가 매우 유사한 것으로 나타났다. 흡수정과 배수지의 수위 제어는 운영 하한 및 상한수위에서 펌프 대수 또는 마력이 조정되도록 모델링하여 목표로 하는 수위내에서 운영이 되도록 하였다.
- 연구대상 공업용수 공급시스템에 시스템다이나믹스 모델을 활용한 효과를 정량화하기 위하여, 연간 취수량을 취수하는데 소요되는 최소 전력원단위를 실제 운영한 전력원단위로 나눈 전력원단위 효율을 과거 6년간 비교해보면, 전력원단위 효율은 약 60~81%이며 본 연구에서 개발된 모델을 적용한 결과 과년도에 비하여 전력원단위 효율이 약 5~20% 증가하였고, 전력 비용을 약 7~26% 절감할 수 있을 것으로 나타났다.

본 연구에서는 관망시스템에 시스템다이나믹스 모델의 활용방안을 탐색하여 관망시스템 운영에 관한 방안으로써 모델의 개발 및 분석과 모의 방법에 대하여 논하였다. 본 연구에서 개발된 시스템다이나믹스를 활용한 상수도시스템 모델은 신뢰도가 높은 수도 운영 변수 예측을 통하여 신속하고 합리적인 수도 운영 방향 및 정책 결정, 수도운영자 운영 편의성 제고, 전력비용 절감 뿐만 아니라, 수도시스템간 통합운영시스템 구축, 위기 대응 등에 유용하게 활용할 수 있어, 향후 상수도 운영에 본 연구의 접근방식이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김신걸, 변신숙, 김영상, 구자용 (2006). "시스템 다이나믹스법을 이용한 서울특별시의 장기 물 수요 예측", *상하수도학회지*, Vol. 20, No. 2, pp. 187-196.
- 박수완, 김규리, 김봉재, 임기영 (2010). "상수도 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정 지원을 위한 시스템다이나믹스 모형의 개발", *한국수자원학회지*, 43(7), pp. 609-623.
- 박혜연(2006). "시스템다이나믹스를 이용한 수도사업 성과 예측", 한국과학기술원 석사학위 논문, pp. 12-95.
- 이상은, 차동훈, 박희경 (2006). "시스템 다이나믹스를 이용한 부에노스아이레스 수도사업 양여계약사례의 고찰", *상하수도학회지*, Vol. 20, No. 1, pp. 104-114.
- 윤범석 (2007). "시스템 다이나믹스를 이용한 작은 섬 지역 수자원 이용의 지속가능성 평가", *제한국 과학기술원 석사학위 논문*
- Ahmad, S. and Simonovic, S. P. (2000a). "Analysis of economic and social impacts of flood management policies using system dynamics." *Proc., Int. Conf. of the American Institute of Hydrology, Atmospheric, Surface and Subsurface Hydrology and Interactions*, Research Triangle Park, N.C.
- Ahmad, S. and Simonovic, S. P. (2000b). "Dynamic modeling of flood management policies," *Proc., 18th Conf. of the System Dynamics Society, Sustainability in the Third Millenium*, August 77-10, 2000. Bergen, Norway.
- Ahmad, S. and Simonovic, S. P. (2000c). "System dynamics modeling of reservoir operations for flood management," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 190-198.
- Fletcher, E. J. (1998). "The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources." *Proc., 1st Int. Conf. on New Information Technologies for Decision-Making in Civil Engineering, Montreal*, pp. 909-920.
- Ford, Andrew (1999) *Modeling the Environment*, Island Press, Washington D.C.
- Hannon, Bruce and Ruth, Matthias (1994) *Dynamic Modeling*. Springer-Verlag, New

- York.
- HPS (1993) *Stella II : Technical documentation High Performance Systems, Inc.* NH 03755, 45 Lyme Road, Hanover
- Keyes, A. M. and Palmer R. (1993). "The role of object-oriented simulation models in the drought preparedness studies." *Proc. Water Management in the '90s: A Time for Innovation*, ASCE, New York, pp. 479-482.
- Palmer, R. N. (1998). "A history of shared vision modeling in the ACT-ACF comprehensive study: A modeler's perspective." W. Whipple Jr., ed., *Proc., Special Session of ASCE's 25th Annual Conf., on Water Resources Planning and Management*, ASCE, Reston, VA., pp. 221-226.
- Simonovic, S. P. and Fahmy, H. (1999). "A new modeling approach for water resources policy analysis." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 295-304.
- 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*, 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. *Proc., of the 18th International Conference of the System Dynamics Society*, August 77-10, 2000. Bergen, Norway.
- Sterman, John D. (2000) *Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, New York.
- 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.