

## 광역상수도의 최적운영 및 제어를 위한 수운영시스템 개발

### Development of Water Management System for Optimal Operation and Control in Wide-area Waterworks

남 의 석\*, 우 천 희, 김 학 배  
(Euseok Nahm, Chunhee Woo and Hagbae Kim)

**Abstract :** A water management system is developed to reduce the unit cost of production in wide-area waterworks. Improving productivity in waterworks is to save power rate. We suggest a method to schedule the supply of water according to the time-varying power rate and pump control scheme. Water pipeline analysis package (SynerGEE Water) is utilized to obtain optimal pump control solution adaptation to water demand. Our evaluation results show that developed scheme is more efficient than the conventional.

**Keywords :** water management, demand prediction, pipeline analysis, pump control

#### I. 서론

최근 수도에 대한 소비자의 요구(needs)가 다양화되고 수도사업자에 대한 경영상의 요구도 강화되어 안전한 물의 공급, 수압의 적정화, 갈수(渴水)시나 사고시의 공평한 급수, 에너지 절약, 생산비용의 절감 등이 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 수원 상황, 각 공정에서의 시설 운전 상황, 기능, 시설능력, 여유도, 생산비용 등을 고려하여 수도 시설 전체로서 통합적이고도 효율적으로 운영관리하는 것이 필요하게 된다. 이 때문에, 일반적으로 수운영센터 혹은 급수지령소를 설치하여, 수원에서 급수까지를 집중 감시 제어하는 수운영시스템에 의한 종합적인 운영관리에 대한 요구가 증가되고 있다.

우리나라의 광역상수도는 여러 계통이 단계별로 건설되어 복잡한 용수공급체계를 가지고 있으며, 각 계통이 비상연결관로를 통하여 연계 운영 중에 있다. 또한, 광역상수도의 사업장은 취수장, 정수장, 가압장 및 배수지로 구분할 수 있는데 도·송수시설(취수장, 정수장 및 가압장)과 배수시설(배수지)의 운영 기준은 서로 다르다. 일반적으로 도·송수시설물의 운영기준은 안정적인 용수공급 조건하에 전력요금의 절감이 핵심기준이다. 우리나라의 전력요금은 시간대별(심야, 주간, 저녁)로 2배이상 차이가 나기 때문에 전력요금이 싼 심야시간대에 용수 생산량을 최대화하고 전력요금이 비싼 시간대에는 최소화하는 것이 매우 중요하다. 국내 용수생산단가의 50% 이상이 전력요금이 차지하는 비중이다.

배수시설의 운영기준은 안정적인 용수공급이 핵심으로 배수지의 수위를 일정수준 또는 일정 범위로 항상 유지하는 것이 운영 기준이다. 따라서 서로 상이한 운영기준으로 운

영중인 시설물들을 결합하여 용수공급계통 전체의 생산성을 향상(전력요금 절감에 의한 생산단가 절감)하는 것이 수운영시스템 최적화의 핵심 요소이다. 기존의 최적화는 정수장의 정수지 용량을 활용하는 것으로 전력요금이 싼 심야시간대(22시~익일 08시)에 생산된 용수를 정수지에 저장하고 저장된 용수를 전력요금이 비싼 시간대에 공급하는 방식으로 운영한다[1]. 그러나 일반적으로 정수지 가용 저장 용량이 하루 생산량의 20~30[%]정도 밖에 안되기 때문에 전력요금의 절감에 한계가 있다[2]. 전력요금이 시간대별로 다른 나라에서는 이를 해결하기 위해 대규모의 조정지를 건설하여 운영하고 있으나 이는 건설 초기 설계단계에서 검토되어 건설되어야 하는 것으로 기 건설 운영중인 상황에서는 계측제어시스템의 많은 부분을 변경하여야 하는 문제가 발생함으로 현실적으로 어렵다[3]. 따라서 이런 경우 다른 용수 저장소의 활용방안이 요구되고 있다[4]. 프랑스 파리 수운영시스템인 CME(Center des Movement d'Eau)는 최적운영에 기반을 둔 분석 및 시뮬레이션 시스템으로 개발되어 운영되고 있다. 그러나 이 시스템은 원격 자동운전 기능은 없고 단지 기존 운영을 분석하고 시뮬레이션하여 결과를 레포트 해주는 기술지원 역할이 주를 이루기 때문에 상시 운전이라는 면에서는 불 때 최적운전으로서의 한계를 가지고 있다[5].

광역상수도의 수운영시스템 최적화의 또 하나의 변수의 "펌프의 최적운영"이다. 일반적으로 펌프의 최적운영은 펌프 호기별로 원단위와 전력단가가 가장 낮은 펌프를 많이 운영하는 방법이다. 원단위의 경우는 이를 계산하기 위한 여러 가지 파라미터들의 현실적 계측이 용이하지 않아 시스템적으로 구현하는 것이 어렵다[3]. 전력단가의 경우는 정확한 수요예측만 이루어 진다면 적절한 펌프 조합에 의한 최적화가 가능하다. 기존에는 배수지에서 용수 수수를 배수지 운전자 임의대로 하도록 하고 펌프장(취수장, 가압장)은 이러한 모든 배수지에 용수가 공급되도록 펌프 대수를 조정하는 방식으로 운전하고 있다. 이런 경우 잦은 펌프

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2002. 10. 25., 채택확정 : 2003. 5. 13

남의석 : 극동대학교 정보통신학부(nahmes@kdu.ac.kr)

우천희 : 명지전문대학 전기과(chwoo@mail.mjc.ac.kr)

김학배 : 연세대학교 전기전자공학과(hbkim@yonsei.ac.kr)

의 기동 및 정지를 방지하기 위하여 펌프장(취수장, 가압장) 운전자는 서지타워의 수위를 감시하여 수위가 일정 범위를 벗어나면 펌프를 기동 또는 정지하거나 또는 일부 배수지의 유입밸브를 조작하여 서지타워의 수위를 조정한다. 이러한 방법은 실제 용수를 수용가로 직접 공급하는 배수지의 현황을 전혀 고려하지 않고 단지 안정적인 용수공급에만 중점을 두는 방식으로 실제적으로 최적운영이라는 관점에서 볼 때 개선이 요구된다. 즉, 용수수요량과 배수지 수위를 종합적으로 고려하여 배수지별로 유입되는 유량을 조정하고 상위사업장의 운영방식도 이에 근거하여 운영되는 것이 최적운영의 기본이 된다. 광역상수도의 펌프장은 대부분 대용량 펌프로 대수 제어를 하고 있다. 만약 회전수 제어를 하는 펌프가 설치되어 있다면 압력감시점의 압력과 연동하여 Loop 제어를 수행하면 된다[6]. 대수제어인 경우는 용수수요량을 기초로 공급 유량을 계획하고 기 설정된 펌프스케줄과 공급유량을 이용하여 운영하여야 한다. 따라서 광역상수도의 용수공급시스템의 최적운영을 위해서는 용수수요량 예측과 이를 이용한 펌프 대수 조합에 의한 펌프 스케줄 제어가 매우 중요하다[7].

본 논문에서는 광역상수도의 최적 운영 및 제어를 위한 수운영시스템을 제안한다. 제안된 수운영시스템은 최적 유량 계획기능, 수요예측 및 펌프 최적제어 기능을 갖는다. 최적 유량계획기능은 용수 생산단가의 핵심인 전력요금을 절감하기 위한 것으로 용수공급계통상에 전력요금이 싼 심야시간대의 생산용수를 저장하기 위한 방법으로서 기존의 정수지 운영 용량만을 활용하는 방식을 확장하여 배수지 용량도 함께 활용하는 유량 계획 기법을 포함한다. 전력요금이 싼 시간대에 생산된 용수를 정수지에만 저장하는 것이 아니라 배수지에도 저장하는 방법으로 심야시간이 끝나는 시간에는 배수지와 정수지의 수위가 최고점에 도달하고 전력요금이 비싼 시간대가 끝나는 시간에는 수위가 최저점에 도달하도록 유량을 계획하여 운영함으로써 생산단가를 절감할 수 있다. 이렇게 함으로써 기존의 정수지 운영 용량 활용에 의한 비용절감 부분에 배수지 운영 용량 활용에 의한 비용절감을 추가하게 됨으로써 전체적인 생산단가를 현저히 줄일 수 있다. 이러한 유량계획을 위해서는 시간 단위의 물 수요량 예측이 가능하여야 시간대별로 유량계획이 가능하다.

단기 물수요예측은 주로 정수·배수량을 실시간으로 제어하기 위해 사용되기 때문에 시간단위로 일단위로 급수량을 추정한다. 배수지 및 펌프 가압장 이하의 배·급수 시스템에 대해서 합리적이고 효율적인 운영계획과 유지관리계획을 위해서는 단기 물수요예측이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 일 수요량 예측을 위한 칼만 필터법과, 시간별 물 수요량예측을 위한 주기성분 분석법인 데이터 Granulization 기법을 제안한다.

마지막으로 펌프운영 최적화 기능은 수요 예측값과 관망 해석 패키지(미국 Stoner사의 SynerGEE Water)를 이용하여 펌프절체테이블을 구하고 이를 이용하여 펌프 대수제어를 수행하는 기법을 제안한다[9]. 기존의 펌프 최적화는 개별 펌프의 효율성에 기반한 것으로, 효율이 좋은 펌프를 많이 운영하는 것에 중점을 둔 것이다. 여기서는 개별 펌프의 효

율성 보다는 수요량을 기반으로 전력비가 비싼 시간대에 펌프 운영을 최소화함으로써 에너지 절감을 도모할 수 있는 기법을 제안한다.

제안된 기법들의 효율성을 증명하기 위하여 4일간 현장에 적용하고, 적용 전날의 생산단가와 제안된 방식에 의한 생산단가를 비교한 결과 톤당 5.83[W]의 생산단가 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 증명되었다.

## II. 수운영시스템

일반적으로 수운영시스템의 목적은 1) 급수구역에 충분한 수량과 적절한 수압 확보, 2) 사고나 재해의 긴급대응(긴급시에 물 배분의 확보를 위한 운전관리), 3) 비용 절감(자동화, 원격조작, 감시제어의 집중화에 의한 전력요금 절감, 비용의 저감을 도모) 등이다. 이중에서도 자동화 기술이 발전하면서 경영 측면에서 볼 때 용수생산단가 절감에 의한 비용절감이 핵심사항이다.

본 절에서는 이러한 수운영시스템을 구축하기 위한 설계 고려사항, 시스템 구조 및 최적 운영을 위한 핵심 알고리즘을 기술한다.

### 1. 설계 고려 사항

수운영시스템의 구축을 위해서는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

#### 1.1. 정보의 집중화와 제어

수운영시스템을 원활히 실시하기 위해서는, 수도시설의 각 공정마다의 수량, 수압, 수질, 수위, 기기의 가동상황, 전력 상황, 약품주입상황 등의 정보를 한 장소에 모으고, 이들 정보를 필요에 따라서 가공하고, 각 공정에 피이드백 하는 것이 필요하다. 이들 정보는 시간적으로도 변화하기 때문에 방대한 양이 된다. 따라서 전산장비를 이용하여 각종의 계획, 장래예측, 통계자료 등을 작성하여 업무에 활용한다. 수집하는 정보는 수가 많을수록 다면적으로 상황파악을 할 수 있지만, 정보 양이 많다고 정확도가 반드시 향상된다고 할 수는 없다. 따라서, 수집해야 할 정보는 비용과 운영조건을 고려하고 정하는 것이 중요하다. 더욱이 주요 관로, 급수 장소, 펌프장 등의 밸브, 펌프, 전원 등의 감시, 제어가 직접 시스템에서 될 수 있는 것이 바람직하다.

#### 1.2. 운영 내용

시설이 복잡하게 되어 세밀하고도 또한 여러 가지 목적에 맞는 운영을 도모하고자 하면, 전산장비를 이용한 시스템이 필요하다. 수운영시스템에서는 수집되는 데이터를 어떤 기준에 따라서 처리하여 제어지령을 내는데, 이 처리를 위한 프로그램이 소프트웨어로서 수운영의 know-how에 근거하여 작성되는 것이고, 일반적으로 표 1에 나타내는 내용이다.

이들의 소프트웨어 중에는 에너지 절약, 저수량의 확보, 비용이 적은 정수장이나 배수지의 선택, 사고 때의 보급수의 확보, 직결급수에 의한 압력의 유지, 이상경보치의 판단 등의 사고방식이 포함된다. 실질적인 수운영시스템의 운영은 다음과 같다.

#### · 수원 운영 계획

저수상황, 기상상황, 수요동향, 수질 등을 고려하여, 수계간 원수 운영계획을 하루 단위로 작성한다.

표 1. 수운영시스템 소프트웨어.

Table 1. Example of water management system software.

대상 항목	소프트웨어의 내용
수량, 수압, 수질의 감시	관측수치의 집계, 표시, 기록
기기의 운전상황 감시	기기의 상태감시, 적정제어
사고이상발견, 긴급대응	이상치나 원인의 검출
예측, 계획작성	수요예측, 일일공급량계획, 펌프운전계획
데이터 축적, 자료작성	통계처리, 정보제공

· 정수처리 계획

정수능력을 고려하여 정수장으로의 원수의 할당 계획 및 정수처리 계획을 작성한다.

· 배수 계획

급수구역의 수요특성, 지역의 고저차, 배수량의 변동과 그것에 대한 압력차, 공사 등을 고려하여 하루 단위의 배수 계획을 작성한다.

· 펌프 운전 계획

취수장, 정수장, 급수조, 증압 펌프장 등의 펌프운전계획을, 관로의 송수능력, 펌프능력, 전력 용량, 절체 밸브의 유무, 배수지의 수위 등을 고려하여, 하루 단위로 작성한다.

· 감시업무

수운영 계획에 근거하여 아래와 같은 감시업무를 시행하는데, 이 업무가 통상 수운영의 대부분을 차지한다.

- ① 계획 대비 실적의 차이 수정, 미미한 조정
- ② 사고, 이상의 발견과 그 대응, 지령
- ③ 통화에 의한 현장과의 정보교환
- ④ 기상, 전기사고, 하천수질사고의 정보수집과 전달
- ⑤ 통계 자료, 일보, 월보, 연보 작성

2. 수운영시스템 구조

본 논문에서 제안된 방식은 운전 대상의 수가 많은 광역상수도이기 때문에 운전자가 개별적으로 운영 계획치를 생성하기는 매우 어렵기 때문에 시스템에 의해 자동으로 생성시키는 것이 필요하다. 그림 1은 개발된 수운영시스템의 전체 구성도이다.

용수공급계통에서 유량 관련 데이터가 (분기점별 밸브 및 펌프운전, 취·송수량 등) TM/TC(Tele Metering & Tele Control) 설비를 통하여 DCS(Distributed Control System)로 전송된다. 전송된 데이터들은 DCS 내의 데이터베이스에 엔지니어링되어 저장된다. 중앙컴퓨터(host computer)에서는 이러한 데이터를 정주기로 수집한다. 수요예측 워크스테이션(demand prediction workstation)과 펌프 제어 워크스테이션(pump control workstation)은 중앙컴퓨터에 저장된 데이터를 이용하여 사업장별 운영계획치를 주기적으로 연산하여 중앙컴퓨터를 통하여 DCS로 전송한다. 이러한 운영계획은 DCS를 통하여 현장 제어기로 전송된다. 이후의 제어결과가 실적치와 예측치와의 오차가 허용오차 이상인 경우는, 중앙컴퓨터에서 재연산 작업이 수행되어 산출결과가 재전송된다. 관망해석 워크스테이션(pipeline analysis workstation)은 운영자의 필요에 따라 오프라인으로 주요 관로상태를 해석하거나 시설 변경에 따른 펌프절체데이터의 재작성에 사용된다. 시설물 상태감시 워크스테이션(monitoring workstation)은 주

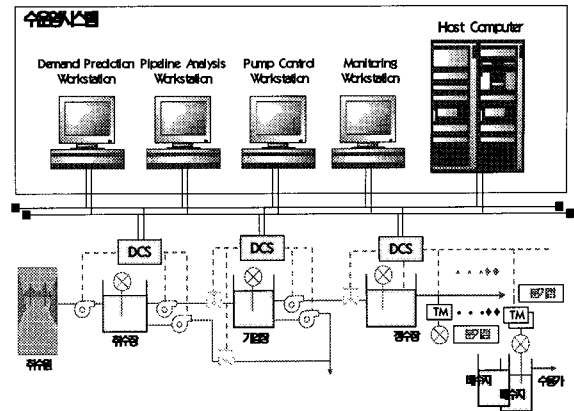


그림 1. 광역상수도 수운영시스템 구성도.

Fig. 1. Block diagram of water management system in wide-area waterworks.

요 시설물의 상태감시(유량감시, 트렌드, 레포트 등)를 위해 사용된다.

운영계획치는 수요예측 워크스테이션에서 매일 0시에 자동으로 계산하여 하부 제어기로 전송된다. 수요예측 워크스테이션은 운영조건 및 시설 용량 등에 의거하여 배수지별 일단위 수요예측을 실시하고 이를 토대로 배수패턴 해석에 의한 시간별 수요 예측량을 산출한다. 시간별 수요예측량과 시설 및 운영조건(수위 조건, Peak 전력량, 관로 조건, 유수율 등)을 고려하여 사업장별 시간별 유량(정수장 유입유량, 취수장 및 가압장 송수 유량)을 계산한다. 이 경우 취수장 및 가압장의 취·송수량은 펌프의 대수에 따라 취·송수량을 수정하고, 수정된 계획 유량에 따라 각 사업장별 송수량을 산출하여 1일분의 운영계획을 수립한다.

III. 최적운영 기법

사업장별로 운영계획수립의 단위는 시간(Hour)이다. 그림 2는 전체 알고리즘 흐름도 및 관련 파라미터를 보여준다. 수요예측이 요구되는 배수지 유출유량의 일 사용량을 예측하고 배수패턴 해석에 의해 시간별 산출량을 계산하는 것이 먼저 수행되어야 한다(수요예측 알고리즘). 시간별 수요량이 계산되고 나면 정수지와 배수지의 현재 수위를 이용하여 시간별 유입량 계획과 수위계획을 수립한다(지운영 알고리즘). 취수장과 가압장은 하위 사업장의 유입유량이 계산되면 관로손실을 계산하여 취·송수량을 결정하고 이로부터 펌프절체데이터를 이용하여 펌프 용량별 운전 스케줄을 작성하게 된다. 펌프절체데이터는 펌프특성과 관로 수리계통 등을 이용하여 관망해석 패키지(미국 Stoner사의 SynerGEE Water)를 활용하여 구한다.

1. 수요예측

물수요예측을 기간별로 크게 구분하면, 장기예측과 단기예측으로 나눌 수 있다. 장래의 수도시설의 건설 혹은 확장 계획 등의 연간계획의 제량(諸量)을 결정하는 일을 목적으로 한 물 수요예측을 장기예측으로 한다. 한편, 수도시설의 합리적인 물운용과 유지관리계획을 목적으로 하루 또는 시간계획의 물수요예측을 단기 물수요예측이라 한다[7].

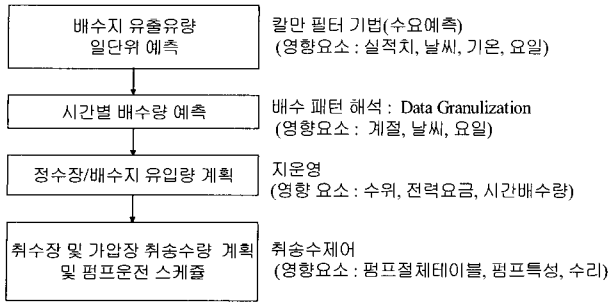


그림 2. 최적운영 알고리즘 흐름도.  
Fig. 2. Flow of algorithm for optimal operation.

도시의 물수요는 여러 가지 요인에 영향을 받아 시시각각 변화하고 있다. 일반적으로 물수요변동은 경향변동(시계열의 변동이 장기간에 걸쳐 일방적으로 증가/감소하는 변동), 순환변동(규칙적 반복적인 변동으로, 주기성이 있는 주기변동과 비주기변동이 있다), 계절변동(1년을 사이클로 하여 규칙적으로 반복되어지는 변동), 우연변동(불규칙한 변동으로 다른 규칙적인 변동의 착란인자가 된다)의 변동요인으로 구성되어져 있다[8].

현재까지 물수요예측은 그 목적에 따라서 여러가지 예측방법이 제안되어져 있으나, 단기 물수요예측에 적합한 모델을 선정하기 위해 마크로적 예측방법으로서 잘 알려져 있는 2가지 방법이 있다. 예측식에서 발생한 잔차의 대치수정을 실행하는 칼만 필터(Kalman Filter)모델, 경제시계열의 예측에 이용되고 있는 다원 ARIMA(Multiple Auto Regressive Intergrated Moving Average)모델이다. 본 논문에서는 칼만 필터 모델을 이용한다. 수운영시스템의 수요예측은 일 사용량 예측과 또한 이를 기반으로 24시간 시간별 사용량 예측으로 구분된다. 본 논문에서는 일 사용량 예측을 위해 칼만 필터 모델을 이용하고 시간별 사용량 예측은 Data Granulization 기법을 사용한다.

1.1. 칼만필터 일 수요량 예측 모델

일 단위 물수요의 예측의 바람직한 예측순서는 우선 물수요에 영향을 미치는 요인들을 선정하고, 이들에 대해 각 모델에서 요구하는 검증을 거쳐 모델화를 이루는 것이다.

먼저 물수요량에 영향을 주는 인자들을 전진선택법에 의하여 일차적으로 선택한다. 이후, 선택된 인자들이 다중공선성과 오차의 자기상관성을 분산팽창인자와 더빈-왓슨(Durbin-Watson)통계량을 분석하여 인자를 최종 선택한다. 따라서, 인자의 선택 기준에 의해 결정된 인자는 물수요예측 모델의 정확도를 극대화시키면서 모델의 완결성과 선정된 인자의 적정성을 함께 만족시키는 모델로 구성된다. 이는 중회귀법에서 사용하는 방식으로 칼만필터법에는 이러한 기법이 없으므로 중회귀법에서 사용하는 이러한 방법을 사용하면 칼만필터 모델의 성능을 개선할 수 있다. 그림 3은 인자선택 기준을 나타낸다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되고 있는 영향인자들인 날씨(운량, 온도, 강수량, 적설양, 풍량, 풍속), 요일, 계절 영향인자를 일차적으로 선택하였다.

영향인자가 결정되면 칼만필터 모델을 구축할 수 가 있

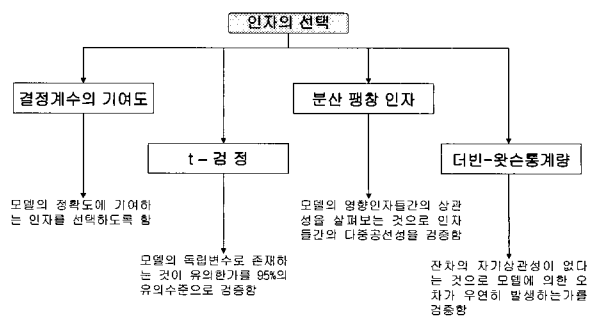


그림 3. 인자의 선택 기준.  
Fig. 3. Criteria of influence factors.

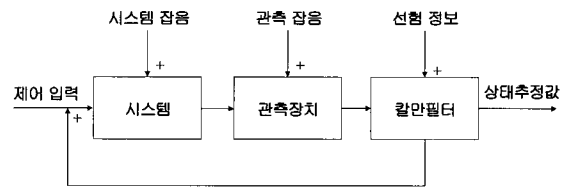


그림 4. 칼만필터 모델의 순서도.  
Fig. 4. Flow of Kalman Filter model.

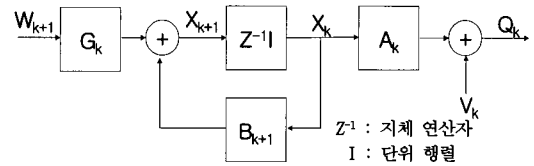


그림 5. 칼만 필터의 이산형 동적 선형시스템.  
Fig. 5. Discrete dynamic linear system of Kalman Filter model.

다. 일반적으로 시스템은 제어입력값과 외란을 받으며, 시스템의 상태는 관측장치를 통하여 관측된다. 관측 값은 잡음에 의하여 흩어질 수 있으므로 직접적으로 관측되지 않는 것도 많다.

이와 같은 상황에서 칼만 필터모델은 관측 자료로부터 시스템의 상태에 관한 정보를 추출하는 것이다. 이 방법은 시계열 출력을 생성하는 시스템의 동적 특성에 주목하여 잡음의 통계적 성질을 가정하여, 초기값 정보와 시간마다 관측된 자료를 이용하여 시스템의 상태를 순차적으로 추정하는 것으로 그림 4와 같다[10].

이 칼만 필터는 이산형 동적 선형시스템(Discrete Linear Dynamical System)에서 시간 t일 때의 입출력 변수의 관측자료를 기초로 하여 t에서의 상태량을 최적으로 추정하는 방법으로 (1), (2)와 같은 차분방정식에 의해 기술된다[11].

$$Q_{k+1} = A_k X_k + V_k \tag{1}$$

$$X_{k+1} = B_{k+1} X_k + G_k w_{k+1} \tag{2}$$

여기서,  $Q_k$  : 관측값,  $A_k$  : 변환벡터,  $X_k$  : 상태벡터,  $V_k$  : 관측잡음,  $B_k$  : 변이행렬,  $G_k$  : 구동행렬,  $w_k$  : 시스템 잡음 (1)은 상태방정식, (2)는 관측방정식이라 불리며,

그림 5와 같이 표현된다.

여기서  $X_k$ 는 시간  $t_k$ 의 시스템 상태를 표현하는 것으로 상태 벡터라고 한다. 시스템의  $z^{-1}$ 은 단계지체연산자를 표현하며,  $X_{k+1}$ 을 한 시점 앞으로 변환시켜준다. ( $X_k = z^{-1}X_{k+1}$ )시스템의 과정은 가우스과정에 따른다고 가정되며, 한시점 앞의 상태  $X_{k+1}$ 은  $k$ 시점에서의 시스템 행렬  $B_k$ 와 시스템의 잡음  $w_k$ 를 입력자료로 하는 동적 선형시스템으로 표현된다.

• 필터방정식 :

$$X_{k+1/k} = F_k \{ X_{k/k} + K_k (Q_k - A_k X_{k/k} - 1) \} \quad (3)$$

• 칼만게인 :

$$K_k = P_{k/k-1} A_k^T [A_k P_{k/k-1} A_k^T + R_k]^{-1} \quad (4)$$

• 오차 공분산 행렬방정식 :

$$P_{k+1/k} = P_{k/k-1} - K_k A_k P_{k/k-1} + S_k \quad (5)$$

여기서,  $Q_k$  : 관측값,  $A_k$  : 변환행렬,  $X_k$  : 상태벡터,  $V_k$  : 관측잡음,  $B_k$  : 변이행렬,  $W_k$  : 시스템 잡음 벡터,  $R_k$  : 관측잡음의 공분산행렬,  $P_{k/k-1}$  : 상태량추정오차 공분산행렬,  $S_k$  : 시스템 잡음의 공분산행렬

위의 칼만필터 모델에서 상태값  $X_k$ 의 변화를 표시하는 행렬  $B_k$ 와 시스템의 입출력관계를 표현하는 관측행렬  $A_k$ 는 모델의 적용대상의 물리적 구조를 기본으로 설정되며, 관측값  $X_k$ 를 그림 5의 루프를 통하여 상태량  $Q_k$ 를 추정한다.

1.2. 시간 사용량 예측

시간별 용수 수요예측은 기존의 시간별 실적데이터의 시계열에 의한 예측을 이용하는 것이 아니라 일 예측량에 정해진 배수패턴을 곱하여 시간별 용수 수요량을 예측하는 것이 일반적이다. 즉, 일 단위의 수요량은 기존의 일 단위 실적데이터와 일상생활과 관련된 요일, 기온, 날씨 인자 등을 추가하여 시계열 모델링에 의해 예측하고, 이로부터 시간별 수요량은 일 수요량에 해당 배수패턴을 곱하여 이를 예측하는 것으로 효과적인 시간별 수요량이 예측되기 위해서는 최적의 배수패턴의 구현이 핵심이 된다. 즉, 해당일의 배수패턴 설정 기준이 예측 성능에 핵심요소가 된다. 본 논문에서 배수패턴은 데이터 Granulization 기법에 의해 계산된다.

데이터 수집의 가능성 및 관련 시간과 비용의 절감을 위해 적정수의 샘플 데이터로부터 기대수준 이상의 정확도를 유지하는 예측치 제공을 위해 데이터 Granulization 기법을 이용하여 데이터를 분류하고, 분류된 데이터의 환산 평균에 의해 배수패턴을 설정한다.

데이터 Granulization은 시변 데이터들을 특성에 따라서 Class로 분류하는 기법이다. 즉, 특성(예를들어, 요일, 날씨)에 따른 여러 형태의 granule을 구성하고, 구성된 granule을 유사한 형태들끼리 분류하여 Class로 정의한다. 이러한 Class 데이터를 모델 함수의 과거 데이터로 사용함으로써 효과적인 패턴 설정이 가능하다[12].

이러한 모형화 방법은 접근 방법에 있어서 사회·경제적

파라미터들과 다른 시변 파라미터들 사이의 커다란 차이를 인식하여 서로 다른 개념에서 출발한다. 사회·경제적 파라미터들이 데이터의 빈번한 수집이 불가능한 반면에 시변 파라미터들은 특성상 잦은 변화로 인해 통계적 데이터의 수집이 용이하다. 계절과 요일적 특성에 의해 같은 형태의 데이터들로 분류하는 경우 예를 들어, 봄이고 평일이며 같은 시간대인 데이터들은 여러개가 있을 것이다. 이런 식으로 정해진 Time Window 내에서 총 데이터를 갖는 형태의 데이터들로 분류하고 이러한 데이터들은 각각의 상황에서 특성 클래스의 배수 패턴을 추정하는 과거 데이터로 사용된다[13].

데이터 Granulization은 기본적으로 시간계수와 기후계수에 기초하여 이루어진다. 시간계수는 계절계수와 요일 계수로 구분되고, 기후계수는 날씨계수로 구분된다. 계절 계수는 일반적으로 봄/가을, 여름, 겨울 세개로 구분되나 데이터 변화 자체가 느리기 때문에 어느 특정 날짜를 기준으로 데이터를 분류하는 것이 비효율적이고 경계점 부근에서의 오차 증가의 큰 원인이 될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 계절요인은 Data Time Window의 기준으로만 사용한다. 즉, 사용될 데이터 범위를 정하는데 사용한다. 요일계수는 월요일~일요일 7개로 분류한다. 날씨 계수는 주거 형태에 따라서 여러가지 요인이 가능하나 맑음/흐림, 비/눈 2가지로 구분한다.

이러한 알고리즘을 기초로 과거의 샘플 데이터들을 이용하여 클래스별 배수 패턴을 연산한다. 즉, 단일 클래스내의 요소(element)인 모든 granule을 바탕으로 해당 클래스의 배수패턴이 환산 평균하여 연산된다. 특정 클래스의 샘플 granule의 index인 윈도우 크기는 (6)과 같다. 그림 6은 특정 클래스를 나타낸다.

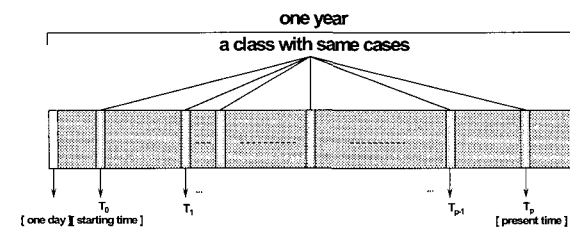


그림 6. 특정 클래스.

Fig. 6. Specific class.

$$Window \text{ 크기 } N : t_k = \{ t_1, \dots, t_{p-1}, t_p \} \quad (6)$$

(  $t_0$  : 시작시점,  $t_p$  : 현재시점 )

특정 지역에서의 이러한 index들을 이용하여 특성계수들에 의해 할당된 모든 클래스에 관한 샘플 데이터를 수집하여 현재 기준시점  $t_p$ 의 배수패턴  $M(t_p)$ 가 (7)에 의해 예측된다. 모델의 결정 요소  $\hat{g}(\cdot)$ 는 환산평균 함수가 된다.

$$M(t_p) = \hat{g}(M(t_1), M(t_2), \dots, M(t_{p-1})) \quad (7)$$

여기서,  $M(t_p) = \{x_1, x_2, \dots, x_{24}\}$ ,  $\sum_{i=1}^{x=24} x_i = 1$

Window 크기는 데이터 granule의 개수가 된다. 이는 데이터의 종류와 수집 방법에 영향을 받으므로 실제적 운영으로부터의 피드백 입력 활용이 가능하다. 또한 정확도와 계산량 간에 상호보완이 고려되어야 한다.

2. 유량계획

유량계획은 배수지 및 정수지 수위를 상한한 수위 이내에서 유지하면서 시간별 배수량 변화를 흡수하여 전력요금에 따른 시간대에 가능한 많은 물을 공급하고 또한 펌프 기동정지 횟수 변동을 적게되도록 계획한다. 1일은 심야(22:00~08:00), 주간(8:00~18:00), 야간(18:00~22:00)으로 구분되며 전력요금이 가장 싼 시간대인 심야시간대가 끝나는 8시에는 지의 수위를 운용 상한이 되도록 하고, 심야시간대가 시작되는 22시에 수위는 운용 하한이 되도록 목표수위를 설정하며, 심야 끝 시각(08:00)부터 심야 시작시각(22:00) 사이의 심야 시작시각(22:00)부터 심야 끝 시각(08:00) 사이의 수위곡선은 시간별 배수량을 고려하여 가능한 유입량의 변동이 최소가 되도록 운용 목표 수위곡선을 생성한다. 목표 수위곡선이 생성되면 목표 수위 곡선과 배수량 예측치에 따라 유입량 계획치가 생성된다. 단, 배수지 운용에 있어서는 모든 배수지 유입밸브가 100% 개도(open)되어 있다고 가정하고 배수지의 유입량은 밸브로 조정한다는 가정하에 지운용을 한다.

시간대별(심야, 주간, 저녁) 전력 비용과 배수지 수위를 고려하여 시간별 배수량을 수정한다. 즉, 전력비가 싼 심야 시간대에는 배수지 수위가 운용 상한에 위치하도록 하고, 전력비가 고가인 주간 시간대에는 배수지 수위가 운용 하한에서 운용되도록 시간별 배수량을 수정한다. (8)과 같이 시간대별 배수량 평균값을 구하고, (9)~(11)과 같이 경제적 배수지 운용을 위한 배수지 운용 여유 변화분  $\Delta V$ 와 시간대별(심야, 주간, 저녁) 배수량 평균값  $Q_{ave}(S)$ 를 이용하여 시간대별 공급량  $Q(S)$ 를 구한다. 여기서,  $S = \{\text{심야, 주간, 저녁}\}$ 를 나타낸다.

$$Q_{ave}(S) = \frac{\sum_{i=1}^n Q(t)}{n-i+1} \tag{8}$$

여기서,  $i$ =시간대 시작 시간,  $n$ =시간대 끝 시간,  $Q(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 배수량 예측치를 나타낸다. 심야 시간대의 배수량은 (9)와 같이 계산된다.

$$Q(\text{심야}) = Q_{ave}(\text{심야}) + \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{9}$$

$$\Delta V = (OWL - CWL) \times A$$

여기서,  $\Delta t$ 는 시간대별 시간간격으로 심야=8, 주간=10, 저녁=4,  $OWL$ (Operation Water Level)는 시간대별 운용 수위,  $CWL$ (Current Water Level)은 대상별 시간대별 현재 수위를 나타낸다.

주간 및 저녁 시간대의 배수량은 주간과 저녁을 같은 시간대로 간주하여  $\Delta V$ 를 계산하고, 단지 전력요금에 반비례하여  $\Delta V$ 를 주간과 저녁 시간대로 나누어 (10)과 같이 계산한다.

$$Q(\text{주간}) = Q_{ave}(\text{주간}) + \frac{\Delta V}{\Delta t} \times \frac{C_{\text{저녁}}}{C_{\text{주간}} + C_{\text{저녁}}} \tag{10}$$

$$\Delta V = (OWL - CWL) \times A$$

$$Q(\text{저녁}) = Q_{ave}(\text{저녁}) + \frac{\Delta V}{\Delta t} \times \frac{C_{\text{주간}}}{C_{\text{주간}} + C_{\text{저녁}}} \tag{11}$$

$$\Delta V = (OWL - CWL) \times A$$

여기서,  $C_{\text{주간}}, C_{\text{저녁}}$ 은 각각 주간과 저녁의 전력 요금,  $OWL$ 는 주간 저녁 시간대를 합한 시간대의 운용 수위를 나타낸다. 그리고, 22시~24시는 심야시간대이지만 별도로 0시~8시까지의 심야시간대의 환산 비율을 적용하여  $\Delta V$ 를 (12)와 같이 계산한다.

$$\Delta V(22\text{시} \sim 24\text{시}) = \Delta V \times \frac{2}{10} \tag{12}$$

$$\Delta V = (OWL - CWL) \times A$$

시간대별 유입량이 결정되면 현재로부터  $t$ 시간 이후의 계획수위가 (13)과 같이 계산된다.

$$PWL(t) = CWL + \frac{(Q_{in} - Q_{eff})}{A} \tag{13}$$

여기서,  $PWL(t)$ 는  $t$ 시간 후의 계획 수위,  $CWL$ 는 현재 수위,  $Q_{in}$ 는 현재부터  $t$ 시간까지 유입량 총합,  $Q_{eff}$ 는 현재부터  $t$ 시간까지 유출량 총합,  $A$ 는 지의 단면적을 나타낸다.

3. 펌프 제어

취수장 및 가압장의 펌프운영계획 수립은 관망해석 패키지(Syncergec)를 이용하여 펌프특성 및 관로 특성 등을 고려하여 가장 효율적인 펌프절체데이터를 구하고, 이로부터 예측된 유량공급을 위한 최적 펌프운전 대수를 결정하여 운전한다. 그림 7은 관망해석과 연계된 취송수 제어 운영 흐름도이다.

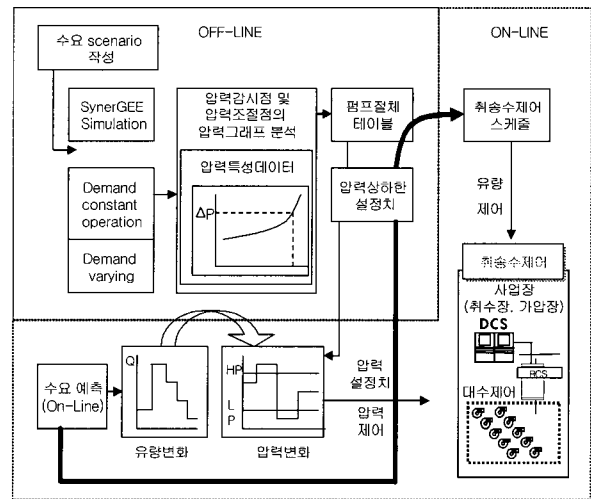


그림 7. 취송수제어 구성도.  
Fig. 7. Block Diagram of Pump Control.

수요예측 실행결과인 사업장별 시간별수요량을 기초로 관망해석 패키지의 Off-line Simulation을 통해 얻어진 해당 사업장의 용수 수요량별 펌프 운전 대수 조합을 이용하여 시간별 펌프운전 대수계획을 자동으로 생성한다. 즉, 수요량과 펌프 성능 곡선을 이용하여 수요량에 대한 시간별 운전 펌프대수를 계획한다. 효율적인 펌프운전대수 결정을 위하여는 사업장별 최대사용전력을 고려하여 펌프의 최대운전대

수를 초과하지 않도록 계획한다.

펌프절체데이터블은 다음과 같은 방식으로 계산된다.

- 1) 유량의 증가에 따라 관로의 저항곡선이 달라지므로 유량별로 종점에서의 관로저항 곡선을 찾아낸다. 종점까지 물이 도달하기 위해서는 관로의 손실수두를 고려한 만큼의 양정고가 펌프 토출측에서 요구된다. 유량의 증가에 따라 손실수두가 증가하므로 각 펌프 대수별 양정고에 대하여 종점까지 도달할 수 있는 최대 유량을 구하기 위하여 유량에 대한 종점에서의 관로저항 곡선이 필요하다.
- 2) 종점보다 높은 양정고를 필요로 하는 부분이 있으면 이 부분에 대한 관로저항 곡선을 찾아낸다. 관로의 중간에 종점에 도달하기 위한 필요양정 보다 더 높은 양정을 필요로 하는 부분이 존재할 수 있다. 따라서 이 점을 찾아내어 이 점에서의 관로 저항 곡선을 구해 펌프 운전대수별 최대 유량을 산출할 필요가 있다.
- 3) 위의 두가지 조건을 고려하여 펌프 대수별로 최대 유량을 찾아낸다. 위의 두가지 조건을 만족시키는 최대 유량이 해당 펌프대수에 의해 보낼수 있는 최대 유량으로 결정되며 각 펌프 운전 대수에 대하여 최대 유량을 찾아내면 곧 이는 유량범위에 대한 펌프 운전대수를 결정하는 것이 된다.

IV. 성능평가

본 연구에서 제안한 기법의 성능평가를 위하여 그림 8과 같은 용수공급계통을 갖는 상수도에 기법을 적용하여 성능을 평가하였다.

본 논문에서는 정수장 후단의 분기점 1개소의 후단 배수지 한 1개소(일 평균 사용량 40,000톤)를 대상으로 4일간 시험운영하여 성능평가를 하고 이를 근거로 전체 분기점이 제안된 방식으로 운영되었을 때의 효과를 정량적으로 제시한다.

대상 배수지의 일 수요량 예측을 위하여 먼저 영향요소를 Durbin-Watson의 통계량 분석 기법을 통하여 수행한 결과 전일 실적치, 날씨, 낮 최고기온, 요일이 영향요소로 최종적으로 선택되었다. 이들 영향요소를 입력변수하여 일 수요량 예측 칼만필터 모델을 구성하고 일 수요량을 예측하였다. 데이터 Granulization 기법을 사용하여 시험운영일의 배수패턴을 구하고 이를 일 수요량 예측치에 곱하여 시간별

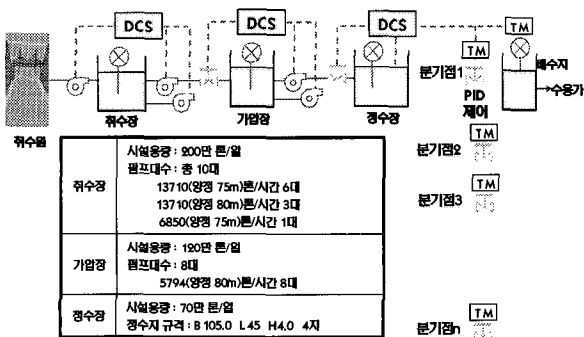


그림 8. 시험운영 상수도시스템.  
Fig. 8. Waterworks for test operation.

수요량을 예측하였다. 시간별 배수량 예측치와 배수지 현재 수위를 이용하여 배수지 유입유량 계획 및 수위계획을 작성하였다. 또한, 정수장의 유출유량계획, 유입유량계획 및 수위계획치도 같은 방식으로 계산된다. 대상 분기점을 4일간 운영한 결과 4일간 평균 일배수량 오차와 시간별 배수량 오차는 각각 8.07[%], 14.46[%] 였다. 또한, 시험운영기간중 분기점으로 공급된 유량의 계획 대비 실적은 그림 9와 같다.

시험운영 기간중의 유량계획치의 특성을 살펴보면 전력

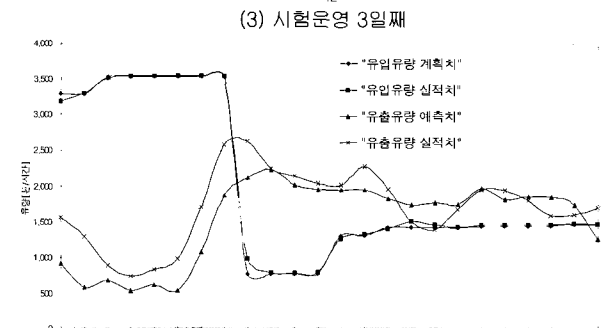
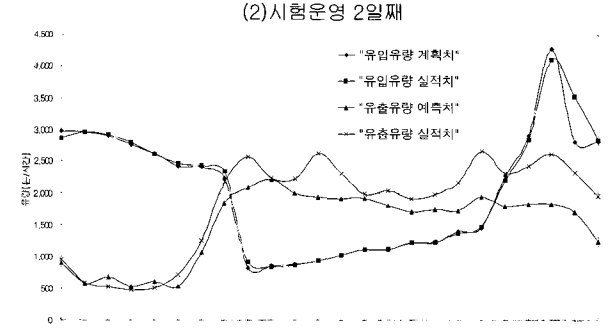
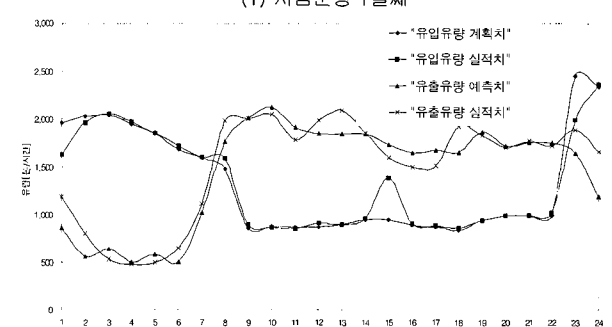
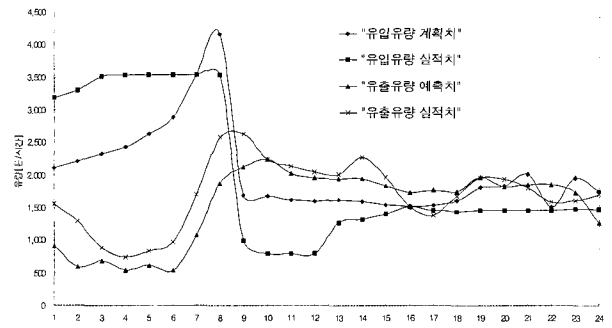


그림 9. 예측 오차 그래프.  
Fig. 9. Graph of prediction errors.

요금에 썩 심야시간대의 공급유량이 많고 전력요금이 비싼 주간 및 저녁시간대의 유량은 적게 계획되었음을 알 수 있다. 시험운영 1일체의 심야시간대(00시~08시)와 4일째 심야시간(22시~00시) 유량계획치가 주간시간대 보다 크지 않은 이유는 실제 시험운영을 1일째 10시부터 4일째 18시까지 실시하였기 때문이다. 또한, 심야시간대의 유입량이 시험 마지막 일이 가장 큰 이유는 배수지 운영수위를 4일째 가장 높이 설정하였기 때문이다.

취수장 및 가압장의 경우 정수장 유입량이 가압장 송수량이므로 가압장 펌프운전계획은 관망해석을 통해 얻어진 펌프절체테이블과 송수량 계획치를 이용하여 결정된다. 가압장 송수량이 취수장 송수량이 되므로 같은 방식으로 계산된다. 취수장과 가압장의 펌프절체테이블은 표 2, 3과 같다. 표 2, 3에는 펌프 대수별로 공급가능한 최소 유량, 최대 유량, 최소 양정고 최대 양정고가 표시되어 있다. 예를 들어 취수장의 경우 유량계획치가 40,000톤인 경우 펌프운전대수는 3대가 된다.

이상의 결과를 이용하여 시험운영 전과 후의 대상분기의 운영상의 전력요금 절감 효과를 비교 분석하였다. 표 4는

표 2. 취수장 펌프절체테이블.

Table 2. Pump control table of intake pump station.

펌프 몇수	유량 (톤/시간)		양정고 (m)	
	최소유량	최대유량	최대양정고	최소양정고
1	-	16,500	90.0	70.0
2	16,500	33,000	87.0	70.0
3	33,000	49,500	84.0	70.0
4	49,500	66,000	82.0	70.0
5	66,000	78,375	81.0	73.0
6	78,375	86,625	81.5	77.5
7	86,625	92,125	82.0	81.0
8	92,125	94,875	83.5	83.0
9	94,875	96,938	85.0	84.5
10	96,938	99,000	86.0	85.7

표 3. 가압장 펌프절체테이블.

Table 3. Pump control table of booster pump station.

펌프 몇수	유량 (톤/시간)		양정고 (m)	
	최소유량	최대유량	최대양정고	최소양정고
1	-	6,208	-	70.0
2	6,208	12,416	100.0	70.0
3	12,416	18,625	71.5	70.0
4	18,625	24,833	86.5	70.0
5	24,833	29,550	80.0	73.0
6	29,550	33,213	83.5	70.0
7	33,213	36,525	85.5	81.0
8	36,525	39,113	87.5	84.0

표 4. 사용 전력 요금.

Table 4. Power rate.

구분	전력요금(원/Kwh)				
	시간대	여름 (7,8월)			겨울 (10,11,1,2,3월)
		6월	봄·가을 (4,5,9월)	6월	
선택(I) 요금 (단위:원)	심야(22시~08시)	28.80	28.80	28.80	28.80
	주간(08시~18시)	52.70	52.70	43.70	49.40
	저녁(18시~22시)	43.70	43.70	52.70	59.20

각각 대상 사업장에서 사용하는 전력요금을 나타낸다. 표 4에서 계절에 무관하게 심야시간대의 전력요금이 주간과 저녁시간대의 요금보다 50% 정도 썩 것을 알 수 있다. 표 4는 전력요금이 생산단가의 대부분을 차지하는 취수장과 가압장의 시험운영 전일과 시험운영 기간중의 전력원단위를 나타낸다. 즉, 톤당 생산단가를 나타낸 것이다. 표 6은 배수지 운영수위 운영에 따른 시간대별 용수공급량을 나타낸다. 시간대별 용수공급량이 있어야 취수에서 마지막 수용가까지 용수가 공급되는데 들어가는 비용을 산출 수 있다. 표 7은 시간대별 용수공급량(표 6), 사업장별 원단위(표 5), 사용 전력요금(표 4)을 이용하여 취수에서 마지막 수용가까지 공급되는 유량의 생산단가를 나타낸다.

시험운영 전일의 원단위 24.70[원/톤]과 시험운영 최종일(4일)날의 원단위 18.87[원/톤]를 비교하면 제안된 기법으로의 운영이 5.83[원/톤]의 생산단가 절감의 효과가 있음을 알 수 있다. 대상 분기점의 일 평균 용수 사용량이 40,000[톤/일]이므로 대상 분기점의 일 절감 금액은 40,000[톤/일]×(24.70[원/톤]-18.87[원/톤])= 234,800[원/일] 이다. 만약 상위 정수장의 일 최대생산량(700,000[톤/일])이 모두 제안된 방식으로 운영된다고 하면 약 연간 절감금액은 1,489,565,000

표 5. 전력원단위.

Table 5. Power per m3.

상위 사업장(1)		취수장			
구분		전력사용량 [Kwh/Day]	용수공급량 [Ton/Day]	원단위 [Kwh/Ton]	
시험운영 전	1일	188,160	764,500	0.2461	
	시험운영 기간	1일	185,220	771,500	0.2401
		2일	189,840	789,700	0.2404
		3일	189,000	777,100	0.2432
4일		187,320	788,600	0.2375	
상위 사업장(2)		가압장			
시험운영 전	1일	21,530	780,000	0.2762	
	시험운영 기간	1일	20,580	779,500	0.2744
		2일	25,620	783,500	0.2714
		3일	22,890	772,600	0.2649
4일		26,670	783,800	0.2659	

표 6. 시간대별 배수지 유입유량.

Table 6. Inflow rate of distributing reservoir in each time zone.

구분[분]	주간	저녁	심야	합계
시험운영 전	1일 18,183	6,416	6,092	30,691
시험운영 기간	1일 16,380	7,936	14,793	39,109
	2일 9,441	3,957	18,731	32,129
	3일 10,646	10,599	27,754	48,999
	4일 11,766	5,820	30,600	48,246

표 7. 생산 단가 원단위.

Table 7. Unit cost of production[₩/ton].

구분[톤]	주간	저녁	심야	원단위 [원/Ton]
시험운영 전	1일 469,150	198,383	91,637	24.74
시험운영 기간	1일 416,318	241,717	219,196	22.43
	2일 238,696	119,891	276,091	19.75
	3일 267,216	318,812	406,132	20.25
	4일 292,596	173,443	444,506	18.87



[원/년] 정도로 예상된다.

**V. 결론**

본 논문에서는 광역상수도의 최적 운영 및 제어를 위한 수운영시스템을 제안하였다. 제안된 수운영시스템은 최적 유량계획기능, 수요예측 및 펌프 최적제어 기능을 갖는다. 최적 유량계획기능은 용수 생산단가의 핵심인 전력요금을 절감하기 위한 것으로 용수공급계통상에 전력요금이 싼 심 야시간대의 생산된 용수를 저장하기 위한 방법으로서 정수 지 및 배수지를 고려하는 유량 계획 기법을 포함하였다. 또한, 일 수요량 예측을 위한 칼만 필터법과, 시간별 물 수요량 예측을 위한 주기성분 분석법인 데이터 Granulization 기법을 제안하였다. 마지막으로 펌프운영 최적화를 위하여 수요 예측값과 관망해석 패키지(미국 Stoner사의 SynerGEE Water)를 이용하여 펌프절체테이블을 구하고 이를 이용하여 펌프 대수제어를 수행하는 기법을 제안하였다.

제안된 기법들의 효율성을 증명하기 위하여 4일간 현장에 적용하고, 적용 전날의 생산단가와 제안된 방식에 의한 생산단가를 비교한 결과 톤당 5.83[W]의 생산단가 절감효과를 기대할 수 있는 것으로 하여 증명되었다. 펌프절체테이블에 의한 취송수제어는 효과를 정량적으로 증명하기는 어려우나, 시스템 운영 측면에서 용수수요량 모델과 결합되어 운영될 수 있기 때문에 운영 효율성 개선에 큰 도움이 된다고 할 수 있다.

향후, 제안된 수운영시스템이 전체 현장에서 효율적으로 운영되기 위해서는 예측 오차에 대한 보정 정보가 시스템적으로 제공될 수 있어야 하며, 또한, 이로 인한 펌프의 잦은 기동 정지를 방지하기 위한 수압조정 부분이 필요하다.

**참고문헌**

- [1] 권성일, 이상군, "취수장의 경제적 운영", 수도운영·건설 기술발표 논문집, 제11회, pp. 499-522, 2000.
- [2] 환경부, "상수도 시설기준", 1997.
- [3] LG산전 기술 자료, "일본 동경도 수운영시스템", 1998.
- [4] 일본수도협회, "수도시설설계지침", 1990.
- [5] 한국수자원공사, "전북권통합운영사업 구축을 위한 프랑스 수도시설 운영관리현황 조사결과 보고서", 2000.
- [6] K. E. Lansey and K. Awumah, "Optimal pump operations considering pump switches" *J. Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE*, vol. 120, no. 1, pp. 17-35, 1994.
- [7] L. E. Ormsbee and K. E. Lansey, "Optimal control of water supply pumping systems" *J. Water Resour. Plng. And Mgmt., ASCE*, vol. 120, no. 2, pp. 237-252, 1994.
- [8] A. B. Sakarya, "Optimal operation of water distribution systems for water quality purposes", *PhD dissertation*, Arizona State University, Tempe, Ariz., 1998.
- [9] <http://www.stoner.com>.
- [10] R. G. Brown, P. Y. C. whang, "Introduction to Random signals and Applied Kalman Filtering," Second Edition, John Wiley & Sons, 1992.
- [11] I. Okutani, "Estimation and Prediction of Road Traffic Condition Through Kalman Filter," *Proceeding of JSCE*, no. 289, pp.131~144, 1985.
- [12] G. Melard, "Illustration of the Use of a General Time Series Model," *Time Series Analysis. Theory and Practice* 6, pp. 53~75, 1985.
- [13] R. Thompstone. M. et al, "Grouping of Periodic Autoregressive Models," *Time Series Analysis. Theory and Practice* 6, pp. 35~49, 1985.



**남 의 석**

1968년 2월 1일생. 1991년 연세대학교 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1993), 동대학 박사(1998). 2003년~현재 극동대학교 정보통신학부 전임강사. 관심분야는 시스템 제어 및 응용, 지능형 모델링.



**우 천 희**

1961년 6월 5일생. 1985년 연세대학교 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1993), 동대학 박사(2000). 1995년~현재 명지전문대학 전기과 부교수. 관심분야는 전기 응용시스템, 배전계통, 제어시스템 및 응용, 모델링.



**김 학 배**

1965년 10월 10일생. 1988년 서울대학교 전자공학과 졸업. 미국 미시간대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 석사(1990), 미국 미시간대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 박사(1994). 1996년~현재 연세대학교 전기전자공학과 부교수. 관심분야는 실시간 시스템, 인터넷 웹서버 기술, 디지털 시스템 고장포용 및 신뢰도 평가분야.

아는 실시간 시스템, 인터넷 웹서버 기술, 디지털 시스템 고장포용 및 신뢰도 평가분야.