韓國水資源學會論文集
第42卷 第9號 · 2009年 9月
pp. 759~771

DOI: 10.3741/JKWRA.2009.42.9.759

광역상수도 계통의 Pump 운전비용 최소화

Minimization of Pump Running Cost in the Large-scale Water Supply System

이 광 만* / 강 신 욱** / 김 수 명***

Lee, Gwang Man / Kang, Shin Uk / Kim, Soo Myung

Abstract

The electricity cost of pumping system accounts for a large part of the total operating cost for long distance water supply networks. This study presents a method based on dynamic programming for establishing an joint optimal operation of pumps and storages system on a hourly basis. Analysis is taken of the relative efficiencies of the available pumps, the structure of the electricity tariff, the consumer-demand pattern, and the storage characteristics and operational constraints of the pipe. The possible system objectives and constraints are described. An application of the method to the existing Yangju Water Supply System consisted of two pump station and 5 storage pools under the condition of expanding pumping facility in the part of the Capital Area Water Supply System is presented, showing that considerable electricity cost savings are remarkable. The approach was found to be implementable in real system operation and large-scale water supply system design in respect of minimizing life-cycle total cost.

Keywords : pumps and storages system, joint optimal operation, dynamic programming, electricity cost savings

요 지

장거리 용수공급 시스템에서 전력비용은 전체 운영비용의 큰 부분을 차지한다. 본 연구는 시간단위의 펌프와 배수지 시스템의 최적 운영계획을 평가하기 위해 동적계획기법에 기초한 방법론을 제시하고 있다. 해석방법은 운영비용 최소화 관점에서 펌프용량 확대를 전제로 현재 가용 펌프의 효율적 운전과 전력요금체계, 시간별 용수수요 추이 그리고 배수지 특성과 송수관로의 제약조건 등을 고려하였다. 이를 위해 적용 가능한 시스템 운영목적과 제약조건이 제시되었고 개발된 방법은 수도권 광역상수도 양주계통의 2개 가압장과 5개 배수지를 대상으로 적용하였다. 적용결과는 펌프 확장의 경우 상당한 수준의 운전비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났으며, 이와 같은 방법은 기존 시스템의 최적운영은 물론 생애주기 비용 최소화 측면에서 신규 용수공급 체계의 설계 등에 적절히 활용될 수 있다.

핵심용어 : 펌프와 배수지 시스템, 연계최적운영, 동적계획기법, 전력비용 절감

* 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원
Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(Kwater), Daejeon, Korea 305-730
(e-mail: lkm@kwater.or.kr)

** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(Kwater), Daejeon, Korea 305-730

*** 한국수자원공사 해외사업처 ODA사업팀장
Team Manager, Oversea Project Development Team, Korea Water Resources Corporation(Kwater), Daejeon, Korea 306-711

1. 서 론

최근 생활용수 및 공업용수 공급 시스템은 대규모 광역화 되고 있다. 이는 도시지역의 확대 및 산업시설의 분산 등 꾸준한 수요처의 증가와 함께 일부 지역에서는 자체 취수가 어려워 장거리 상수원을 이용하는 지역이 많아지고 있다. 또한 공급지역도 넓어지고 있어 여러 송수 시스템을 통해 많은 양의 물을 공급하는 추세이다. 이와 같은 용수공급 시스템 운영문제의 핵심은 용수공급의 안전성을 확보하면서 송수를 위한 펌핑에 소요되는 비용을 최소화하고, 적정 수질을 확보하면서 송수계통에서 누수를 최소화하는 것이다(Cembrano *et al.*, 2000). 이중 중점 관리 대상은 비용의 대부분을 차지하는 펌프의 운전계획이다(Creasey, 1988).

실제 광역용수공급 체계의 운영비용은 규모의 크기만큼이나 막대한 에너지와 비용이 소모되고 있다. 현재 6단계까지 완성되어 1일 380만 ㎥의 물을 공급하고 있는 세계적 규모의 용수공급 시설인 서울과 경기도 지역의 수도권 광역상수도 계통이 대표적인 예이다. 이와 같은 양의 물을 공급하기 위한 세부시설로는 광역계통에서만 팔당댐에 2개의 취수설비와 816 ㎞의 관로, 4개의 정수장, 111개의 배수지 및 12개의 가압장이 운영되고 있다. 이들 시설을 운영하는데 사용하는 전력은 연간 504백만 ㎾h이며 비용은 333억원에 이른다. 이중 장거리 송수를 위해 취수장 및 가압장에서 소모되는 전력은 전체 소비량의 약 90 %를 차지하고 있어 비용절감을 위한 펌프운영효율 극대화는 매우 중요한 당면과제이다.

관로에 의한 송수시설은 수용가의 수요량 변화를 흡수하고 관로사고 등으로 인한 단수를 막기 위해 수용가로 배분되기 전에 저류지로 송수된다. 우리나라 상수도 설계기준(건설부, 1985)에 의하면 관수로에 의한 송수시스템에서는 관로와 관로 사이에 1일 최대 수요량의 6~12시간 용량을 갖는 배수지를 설치하도록 되어 있으며, 이것은 시간에 따라 변동하는 수용가의 수요량 변화를 흡수하고 정전시 용수공급과 소방용수 등 비상시 공급 물량을 확보하기 위한 것이다. 따라서 상수도 송수 시스템의 운영관리는 펌프 운전의 안정성과 더불어 공급의 신뢰성 및 펌프 운전비용 절감을 위한 경제성 문제를 고려해야 한다.

따라서 용수공급을 위한 송수 시스템의 최적 운영관리를 위한 연구는 수도산업에서 매우 중요한 과제중 하나가 되었다. 펌프와 배수지를 포함한 운영관리 문제는 주로 운전비용의 절감과 용수공급의 안전성 그리고 펌프 운영의 합리화를 목표로 한다. 펌프와 배수지 최적운영은 적정 용수공급량을 결정하고 가압장의 운전비용을 최소화 하는 것(Yu *et al.*, 2005)과 수요를 고려한 최적의 펌프 시간 계획을 수립하는 것이다(Nitivattananon *et al.*, 1996). 가압장에서 송수량과 배수지 수위를 제약조건으로 하는 펌프운전비용 최소화(Nakahori *et al.*, 1978), 계절별 전력요금을 고려한 시간별 펌프운전 계획(McCormick and Powell, 2003)과 심야전력을 이용한 저비용 펌프 운영과 배수지 운영(Biscos *et al.*, 2003)에 대한 것들이다.

용수공급 시스템의 최적운영문제는 다양한 용수공급원과 복잡한 관망, 다수의 가압시설과 펌프운영대수의 조합 등으로 인해 최적화 해석기법의 한계를 넘는 경우가 대부분이다(Teegavarapu and Simonovic, 2002). 광역용수공급과 같은 복잡한 시스템의 최적운영 방안을 도출하기 위한 수학적 해석기법은 문제의 특성에 따라 선택적으로 이용이 가능하다. 대표적인 것으로는 Linear Programming (LP) (Jowitt *et al.*, 1988; Jowitt and Germanopoulos, 1992), Nonlinear Programming (NLP) (Chase and Ormsbee, 1989; Lansey and Zhong, 1990; Brion and Mays, 1991), Mixed Interger Linear Programming (MINLP) (Zamora and Grossman, 1998; Hostrup *et al.*, 2000), Fuzzy Logic (FL) (Yu *et al.*, 2005), Dynamic Programming (DP) (Fallside and Perry, 1975; Alla and Jarrige, 1988; McCormick and Powell, 2003), 그리고 Simulated Annealing (SA) 등이다.

이와 같은 기법들을 이용한 지금까지의 연구 방법은 주로 경제성 문제에 목적함수를 둔 단일 목적함수에 국한 하거나 여러 목적이 동시에 고려된 다목적 최적 운영에 있어서도 경제성과 안정성의 2가지를 동시에 고려하기 위해 가중치를 적용하여 한 개의 목적함수로 변환한 단일 목적함수로 처리하였다. 실제 운영에 있어서는 송수 에너지 비용에 따른 경제성 뿐 아니라 펌프의 가동률이나 가동 대수 변동에 따른 운전상태의 안정성과 불확실성에 대비한 공급의 신뢰성 등을 함께 고려하는 상수도 송수 시스템의 운영문제는 2개 이상의 목적을 갖는 다목적 최적화 문제(Cohon and Marks, 1975)로 다룰 수 있다. 이를 해석하기 위하여 다목적 분석 기법이 이용되는 데 이 중 가장 널리 이용되는 Weighting 기법(Zadeh, 1963)은 가중치를 각 목적에 부여하여 단일 목적함수로 변환한 후 각 목적의 가중치를 변화시키면서 가장 합리적인 대안을 결정할 수 있다.

이와 같은 이론을 바탕으로 용수공급의 안정성 확보와 수도시설 운영 합리화를 위한 광역상수도 계통의 펌프-배수지 최적운영기법은 수도산업 경쟁력 확보는 물론, 광역과 연계된 지방상수도의 효율개선에 기여할 수 있다. 수도시설의 경제적 운영은 수요량 예측을 통한 최적 공

급량 결정이 필요하며, 이는 배수지 규모, 펌프운영계획 등을 종합적으로 고려해야만 가능하나 그간 용수공급 시스템을 기술적 평가를 바탕으로 한 최적운영에 대한 연구가 미흡하였다. 특히 최근 수도시설 운영전략은 유수율 제고에 중점을 두고 있어, 수도시설의 운전비용을 최소화하고 아울러 배수지의 용수공급 안전성을 확보할 수 있는 기법의 개발이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 수도권 광역상수도 5, 6단계 중 최근까지 지자체에서 경험적으로 운영하던 양주계통의 2개 가압장과 5개 배수지를 대상으로 운영효율 개선을 위한 문제 진단을 통해 개선요인을 평가한 후 펌프와 배수지 운영의 효율을 극대화시킬 수 있는 방안을 수자원 시스템 해석에 적합한 Dynamic Programming을 이용하여 해석하였다.

2. 송수계통(펌프-배수지) 최적 운영

2.1 송수계통 운영목적

에너지, 환경 그리고 수리학적 효율은 용수공급 시스템의 지속가능한 발전에 가장 중요한 목표들이다(Ramos and Covas, 1999). 물 소비 억제, 환경보존 그리고 에너지 절약에 대한 요구는 전 인류가 직면해 있는 관심사항들로 앞으로도 그 중요성은 더해 갈 것으로 예상된다. 용수공급 체계의 운영목적은 질 좋은 물을 수요자에게 충분히 안정적으로 제공하는 것이다. 이를 위해 물을 공급하기 위한 시설운전에서 가장 많은 비용을 차지하는 것이 펌프가동을 위한 전력사용이다. 상수도 송수 시스템의 구성 요소는 관로, 펌프, 배수지가 중심이며 펌프와 배수지는 상호 연계운영을 통해 운영효율을 높이게 된다(Vieiraa and Ramos, 2008).

송수계통 운영은 펌프의 가동률이나 가동 대수의 조절과 배수지의 운전 수위 조정으로 수용가의 수요변동에 대처하며, 펌프 운전에 따른 시스템 안정성의 증대와 시스템 운전에 소요되는 에너지 비용의 절감을 목적으로 한다. 일반적으로 시스템의 안정성은 각 펌프의 운전상태 변화의 최소화를 고려할 수 있으며, 에너지 비용은 펌프의 최적 효율에 적합한 운전과 펌프 수두 및 시간별 전력요금에 따라 결정된다. 따라서 변동성이 큰 수요변화에 높은 신뢰도로 대처하면서 펌프 운전을 안정적으로 유지하고 배수지의 유효 저수 용량을 활용하여 시스템 전체의 운전비용을 최소화시킬 수 있어야 한다.

한편 펌프의 운영 측면에서 보면 펌프 가동대수와 가동률을 가급적 일정하게 유지하는 것이 바람직하나, 용수수요의 시간별 또는 일별 변화에 대처하기 위해서는 배수지의 유효 저수 용량을 활용해야 하므로 배수지의 수위변동이 커지게 되어 배수지를 크게 건설해야할 뿐 아니라 높은 수두 유지에 따라 에너지 사용량이 증가되거나 심야시간의 저렴한 전력을 집중적으로 사용할 수 없어 비용이 증가할 수 있다. 반대로 전력비용 측면에서는 배수지 수위를 낮게 유지하면서 용수수요에 맞추어 펌프 가동률이나 가동 대수를 변경하면서 수요 변화에 적응해야 하며, 전력요금단가가 싼 시간에 펌프 가동을 증가시켜 배수지에 저류하게 되므로 펌프 운전의 안정성은 저하된다.

실제 공업용수나 가정용수의 시간별 수요는 신뢰도 높은 수준에서 예측이 가능하지만 용수수요 자체는 강우처럼 변동성이 크지 않으나 어느 정도 추계학적 성질을 포함하고 있어 불확실성의 수요 변화에 대처하기 위한 신뢰성 문제는 배수지의 잔여 저류량이나 펌프의 가동률 증대로 해결할 수 있다. 그러나 펌프운전의 신뢰성 문제는 시스템의 고장이나 정전 등에 따른 설비적인 측면의 불확실성도 있으나 시설물의 신뢰성 문제는 운영기간 중 배수지의 최소 저수용량을 수요패턴을 고려하여 지속시간 보장량을 구하여 제약조건으로 적용할 수 있다. 이러한 여러 가지 목적들을 동시에 고려하는 최적화 문제에 대한 목적함수는 펌프운전 전력비용 최소화 측면의 경제성과 펌프대수의 조합을 통한 운전의 안정성 그리고 배수지내 잔류수량 확보를 통한 공급의 신뢰성을 고려할 수 있다. 이중 펌프를 통해 가압되는 송수량의 전력소모는 펌핑원단위에 계절별 시간별 전력요금을 적용하여 구할 수 있으며 목적함수는 다음과 같다.

$$Min \sum_{j=1}^{M} \sum_{t=1}^{T} P_{kjt} \cdot U_j \cdot Q_{jt} \quad (1)$$

여기서 P_{kjt}는 k계절 t시간 j가압장의 펌프 전력사용요금(원/kWh)이며, U_j는 j가압장 펌프의 전력원단위(kWh/㎥) 그리고 Q_{jt}는 j가압장 펌프에서 t시간의 공급량(㎥)이다.

한편 펌프 운전의 안정성은 가능한 펌프의 스위치 운전 횟수를 줄여 소모적 전력사용을 억제하고 펌프 운전의 평활화를 유도하고자 하는 것이다. 가압장의 펌프 구성은 가장 효율이 좋은 주 펌프와 보조펌프 그리고 예비펌프로 구성되며 이를 조합하여 설치하는 것이 일반적이며 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$Min(Max)\,(P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \ldots \cdot P_t \cdot \ldots \cdot P_T) \quad (2)$$

여기서 P_t는 운영단계 t에서 가동한 펌프대수로 시스템은 가능한 펌프운영의 변동성을 적게 하려는 목적을 달

성하게 된다.

그리고 용수공급의 신뢰도를 높이기 위해서는 배수지에서 공급할 수 있는 잔여 수량을 높게 유지하게 되며, 배수지 수위가 높아지면 관로의 출구손실이 커지고 이로 인해 가압장에서는 더 큰 압력으로 송수하게 된다. 따라서 배수지 수위는 주어진 운영범위내에서 전력요금이 저렴한 시간에 가능한 많은 양의 송수를 위해서는 배수지 수위가 낮아야 한다. 이 점을 고려한 목적함수는 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$Max(Min)\sum_{l=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}(X_{lt}+Q_{jt}) \tag{3}$$

여기서, X_{lt}는 l배수지에서 기간 t의 초기저류량이며, 이 기간 배수지로 송수될 유량Q_{jt}와 더해져 용수공급을 담당하게 된다.

따라서 Eq. (1)의 목적함수는 송수 시스템의 운전기간 중 펌프의 가동으로 발생되는 총 전력비용으로 송수량과 시간별 전력 단가에 따라 결정된다. Eq. (2)의 목적함수는 송수 시스템의 운전기간 중 시간별 펌프 송수량의 최대 변화값을 최소화 하도록 되어 있으며, Eq. (3)의 목적함수는 송수 시스템의 운전기간 중 시간별 배수지에서 공급 가능한 수량을 많이 확보하여 이후 용수공급의 신뢰성을 증대시키고자 하려는 의도이다. 이렇게 설정된 목적함수는 문제의 특성에 따라 개별적으로 혹은 가중치를 적용하여 다목적 함수로 구성할 수 있다.

2.2 송수계통 제약조건

상수도 송수 단계는 펌프와 배수지를 상호 연계 운영하고 각기 여러 개를 조합하여 병렬로 연결 운영함으로써 운전의 안정성을 높이고 있다. 이러한 시스템의 운영에 있어 송수 단계에서 관로와 펌핑용량에 대한 제약조건의 설정과 배수지의 상태를 추적할 수 있는 물수급 균형을 나타내는 제약조건으로써 상태 방정식 등을 정의하여야 한다. 이를 위해 가압장과 관로에 대한 제약조건으로는 가압장에서 1일 송수할 수 있는 펌프용량의 한계와 관로의 통수능이다. 이 경우 정상적인 운영을 위해서는 펌핑능력이 1일 최대 수요량을 초과하여야 하며, 관로는 이 양을 보낼 수 있는 충분한 크기이어야 하므로 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$\sum_{t=1}^{T} Q_{jt} \le D_{\max j} \tag{4}$$

$$Qp_j \ge D_{\max j} \tag{5}$$

여기서 $D_{\max j}$는 j가압장 펌프의 1일 최대 펌핑가능량이며, Qp_j는 j가압장 펌프와 연결된 관로의 통수능력이다. 대개 펌프의 펌핑능력은 시간단위로 계산하며 관로 역시 시간단위의 통수능을 알 수 있기 때문에 시간단위 혹은 일정운영시간단위로 계산하여 적용할 수 있다.

배수지에 적용되는 제약조건으로는 상태방정식과 상태변수 그리고 결정변수에 대한 경계조건들은 다음과 같다. 이중 상태방정식의 결정변수는 전력비용을 추정하기 위해 펌프를 통해 배수지로 유입되는 송수량으로 일반저수지의 상태방정식과는 역으로 흐르는 개념으로 정의하였다.

$$Q_{jt} = X_{lt+1} - X_{lt} + D_{lt} \tag{6}$$

$$X_{\min jt} \le X_{jt} \le X_{\max jt} \tag{7}$$

$$Q_{\min jt} \le Q_{jt} \le Q_{\max jt} \tag{8}$$

여기서 D_{lt}는 l배수지에서 t기간 동안 공급해야하는 수요량이며, $X_{\min jt}$와 $X_{\max jt}$는 배수지 저수량 운영제약조건으로 하한값과 상한값이고, $Q_{\min jt}$와 $Q_{\max jt}$는 가압장에서 배수지로 연결되는 관로의 송수량 제약조건으로 하한값과 상한값이다.

3. 적용 사례

3.1 시스템 현황과 문제점 분석

최적화기법을 이용한 상수도 송수계의 펌프와 배수지를 연계한 운영에서 비용 최소화 문제를 한국수자원공사에서 운영 관리하고 있는 수도권 광역상수도 5, 6단계 중 양주계통의 송수 시스템에 적용하였다. 한국수자원공사 수도권본부에서 위탁관리 중에 있는 동두천과 양주시 수도시설을 포함하는 양주통합가압장의 후단은 광역상수도와 지방상수가 연계된 시스템으로 체계도는 Fig. 1과 같다.

동두천시는 '07. 1월부터, 양주시는 '08. 4월부터 한국수자원공사가 위탁관리를 시작한 이 시스템의 주요 시설은 양주계통은 2개의 가압장(Table 1)과 5개 배수지(Table 2)로 구성되어 있으며, 양주통합가압장(시설용량 98천톤/일)을 중심으로 용암계통(양주시 및 동두천시)과 백석계통(양주시)으로 이원화되어 개별 운영 중이다. 양주통합가압장에서 공급하는 송수체계는 수도권 광역상수도 5, 6단계에서 백석계통으로는 700 ㎜의 관로 8,500 m에 의하여 백석배수지에 연결되어 운영되고, 용암계통으로는 1,200 ㎜의 관로 1,170 m에 의하여 고덕배수지, 덕정배수지, 상패배수지과 용암가압장을 거쳐

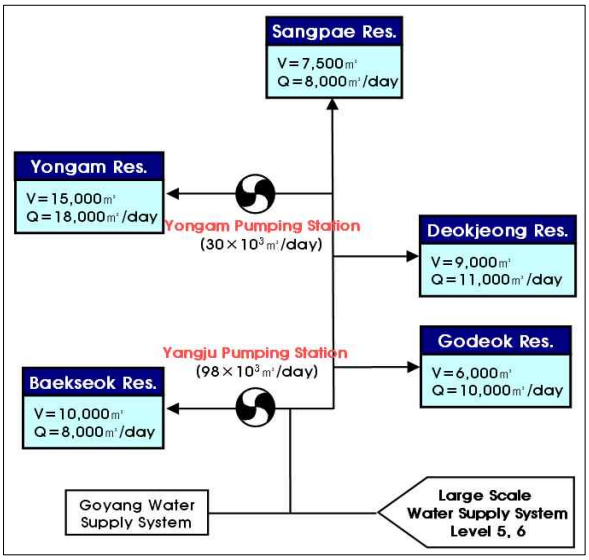


Fig. 1. Integrated Water Supply System in Yangju Line

용암배수지로 연결되어 운영되고 있다. 가압장의 펌프 시설은 양주통합가압장에는 용암계통으로 592마력의 펌프 3대, 329마력의 펌프 1대를 운영하고, 백석계통으로 237마력의 펌프 3대를 운영하고 있다.

이들 시설들의 과거운영 실적을 살펴보면 계절별로 배수지의 시간별 수요량 변화는 서로 상이한 패턴을 보이고 있으나, 개별 배수지의 시간별 수요량 패턴은 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이중 상패배수지의 경우, 겨울철 수요패턴이 타 계절과 다소 상이하나, 이는 동두천 자체시설의 수질변동에 따른 광역물량 변동에 기인한 것으로 조사되었다. 고덕배수지의 변화폭이 상대적으로 큰 것으로 나타났는데 배수지 용량이 작아 수요량의 변화폭에 민감한 것으로 분석되었다. 양주계통 배수지의 요일별 수요추세를 분석한 결과, 시간에 따라 일부 수요 차이는 발생하나, 전반적인 추세는 비슷한 양상을 나타내었다.

3.2 문제점 진단 및 평가모형 개발

펌프와 배수지로 조합된 광역 용수공급 계통에서 발생하는 비용은 펌프가동에 의한 전력요금과 시설물 유지관리 비용이다. 이중 전력소비와 관련된 중요한 사항은 전력요금체계와 펌프운전조합을 결정하는 공학적 요소들이다. 용수공급 시스템의 시설물에 대한 구조적 변화가 없다면 이들 비용발생 요인 중 가장 중요한 것은 전력요금체계이다. 영국의 Water Research Centre (WRC, 1985)는 송수계통의 최적운영을 통해 현재보다 10 %의 비용절감이 가능한 것으로 추정하였다. 펌프운전비용중 또 하나의 중요한 요소는 펌프가동방법(Savic *et al.*, 1997)으로 Lansey and Awumah (1994)는 펌프 스위치의 조작 횟수를 제한함으로서 펌프의 유지관리비용을 제한할 수 있다고 하였다. 따라서 관로, 배수지 규모, 펌프용량, 펌프 스위치 조작 횟수 그리고 전력요금 체계 등을 주요 검토 대상으로 다루게 된다.

본 연구에서는 동두천과 양주시 용수공급을 위한 송수시스템의 최적운영 대안을 도출하기 위해 Fig. 2와 같은 분석절차를 수립하고, 주요 영향인자를 대상으로 개선가능성을 평가하였다. 이중 운전비용에 큰 영향을

Table 1. The Current State of Yangju Water Supply System Storage

Storage	Area (㎡)	Width (m)	Length (m)	Height (m)	Volume (㎥)	High water level (m)	Low water level (m)
Sangpae	1,500	25.0	30.0	5.0	7,500	103.5	108.5
Yongam	3,000	17.5	30.0	5.0	15,000	160.0	155.0
Deokjeong	1,125	18.5	20.0	4.0	9,000	119.9	115.9
	1,125	9.8	37.5	4.0			
Godeok	1,200	12.3	24.6	5.0	6,000	130.0	125.0
Baekseok	2,000	17.5	30.0	5.0	10,000	155.0	150.0

Table 2. The Current State of Yangju Pumping System

Pumping Station		Capacity		Spare facility		Pumping
		Q (㎥/day)	Pump	Q (㎥/day)	Pump	
Yangju Pumping System	Yongam Water Supply Line	64,000	2.5 units	25,600	1 unit	Absorption
	Baekseok Water Supply Line	18,000	2 units	9,000	1 unit	Absorption
Yongam Pumping Station		30,000	3 units	10,000	1 unit	Absorption

미치는 인자는 펌프와 전력요금 그리고 배수지 규모로 분석되었다. 송수관로는 문제가 없는 것으로 조사되었으며 시설개량시 효과에 비해 너무 큰 비용이 요구되어 검토대상에서 제외하였고, 펌프 스위치 조작 역시 실제 실험자료가 취득이 불가능하여 고려하지 않았다. 이중 전력요금은 한전의 판매가격에 준해 계약을 체결하여 사용하기 때문에 목적함수의 비용추정 상수항으로만 고려하고 대안평가에서는 제외하였다. 따라서 실제 운영개선 대안으로는 펌프와 배수지를 대상으로 하였으며 진단결과는 Table 3과 같다.

동두천 및 양주계통 송수시스템과 같이 단일 배수지가 아닌, 다양한 규모, 모든 배수지가 수용가와 연결되어 있어 실시간으로 용수공급을 해야 하는 배수지군의 연계운영방안 수립은 많은 경우의 수와 복잡한 계산이 요구된다. 본 시스템의 운영개선을 위한 평가모형은 과거 운영자료를 근거로 펌프의 전력원단위를 추정하여 송수량과 전력요금의 함수를 구성하는 Eq. (1)에 근거하여 개발하였다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 사전에 LP (linear programming)을 이용하여 주어진 상태방정식 및 제약조건을 만족하는 펌프운전비용 최소화 해의 안전성을 평가하였다. LP를 통해 해의 안전성을 확인한 후 IDP(incremental dynamic programming)(Labadie, 1988)을 적용하여 최종 평가모형을 개발하였다.

3.3 전력요금체계 및 펌프전력원단위

많은 국가에서 전력요금체계를 다원화하고 있는데 계절적 시간별 수요를 감안하여 전력사용량이 적은 시간에 값을 낮추어주는 형식이다. 우리나라도 2008년 11월 13일 고시된 전력요금체계에 따르면 계절별로 여름철, 봄·가을철 그리고 겨울철 3개 구간으로 나누고 시간별로는 심야, 주간 그리고 저녁으로 구분하고 있다 (Table 4). 요금은 전력사용이 적은 심야시간에는 계절적 차이를 두지 않고 가장 싼 요금을 책정하였으며, 주간시간에는 여름철이 높고, 저녁시간에는 겨울철이 높은 구조를 취하고 있다.

따라서 펌프와 저류지로 구성된 용수공급 체계에서 송수방법은 이를 고려하여 결정하게 된다. 결국 용수수요가 적은 심야 전력요금은 첨두 전력의 36 % 수준으로써 배수지의 유효 저수용량을 활용하여 전력비를 감축할 수 있으나 저수지 수위 상승에 따른 고수두 문제와 펌프의 가동 대수 제어에 따른 안정성 문제가 따른다. 또한 심야 전력사용으로 전력비를 감축하기 위해서는 유효저수용량을 최대로 활용하여야 하나 배수지의 용량이 최소가 되었을 경우에는 예측하지 못한 수요증대에 따라 공급차질 등 신뢰성 문제를 야기할 수 있다.

양주계통 용수공급 시스템에는 Table 2와 같이 2개

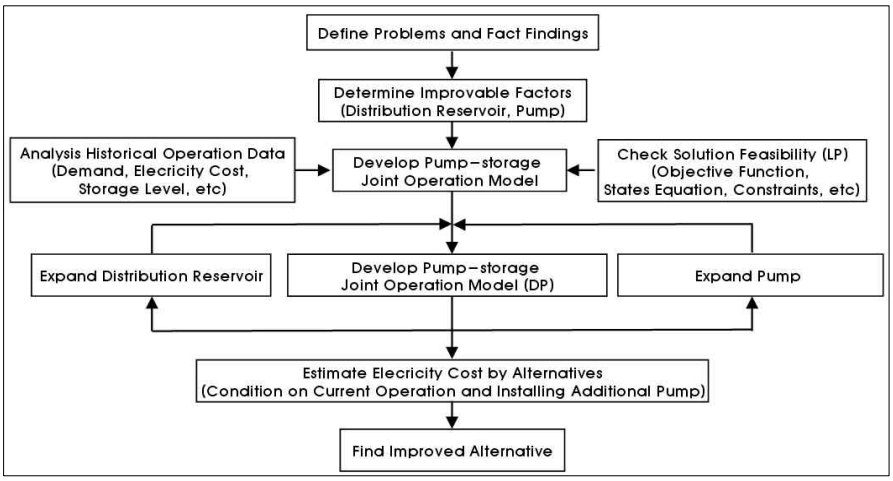


Fig. 2. Problem Definition and Solution Model Development

Table 3. Selection of Improvement Directions based on Problem Findings

Facility	Problems	Improvement
Pumping Station	• Operation without Pump and Storage Optimal Rules • Empirical Operation without Consideration of Different Electricity Tariff • Lack of Knowledge in Water Supply System	• Reducing Operation Cost by Enlarging Pump Capacity
Distribution Reservoir	• Adapting Narrow Operation Buffer at 50~70 % Level • Needing Operation Scenario and Guideline	• Expanding Distribution Reservoir and Operation Buffer

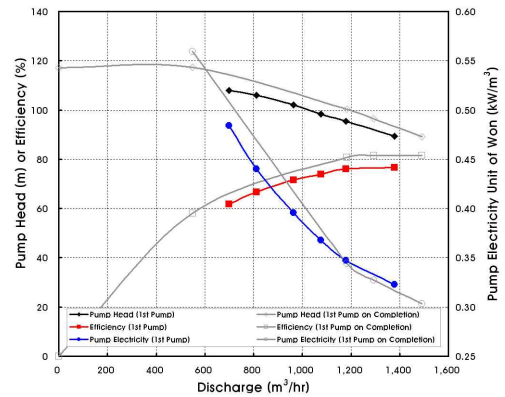
의 가압장에 7대의 펌프가 설치되어 있다. 식 (1)의 펌프전력원단위(kWh/㎥) U_j를 추정하기 위해서는 Fig. 3과 같은 펌프의 효율곡선을 이용할 수 있다. 본 연구에서 적용된 값은 2008년 운영실적을 분석하여 평균값을 이용하였는데 양정은 100~110 m사이이고, 효율은 약 75 % 그리고 이에 따른 펌프전력원단위는 0.3725 kWh/㎥로 계산되었다.

3.4 모형의 적용

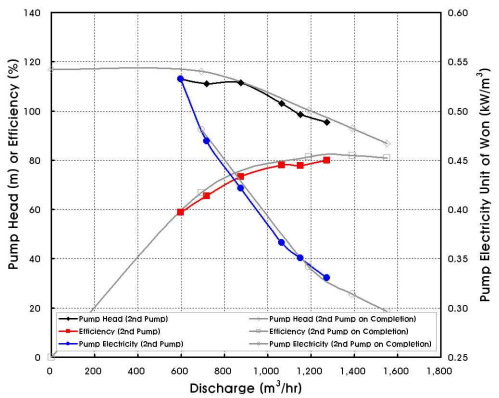
양주계통 가압장 및 배수지 그리고 펌프운전조합의 최적화를 통한 운영비용 절감 가능범위를 평가하기 위해 2007년 운영 자료를 활용하였다. 양주계통 5개 배수

Table 4. Industrial Electricity Tariff (300 to 1,000kW of contracted electricity)

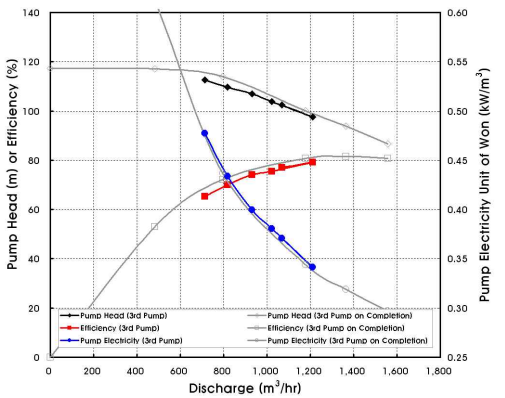
Consumer Option		Basic rate (Won/kW)	Electricity tariff (Won/kWh)				
			Time	Summer (Jul.~Aug.)	Spring & Fall		Winter (Nov.~Feb.)
					(June)	(Mar.~May, Sept.~Oct.)	
High Voltage A	Option I	5,350	Night	40.50	40.50	40.50	40.50
			Day	104.90	72.00	60.00	71.70
			Evening	72.00	60.00	72.00	86.10
	Option II	6,180	Night	36.30	36.30	36.30	36.30
			Day	100.70	67.80	55.80	67.50
			Evening	67.80	55.80	67.80	81.90
High Voltage B	Option I	4,940	Night	39.80	39.80	39.80	39.80
			Day	101.30	69.70	57.90	69.30
			Evening	69.70	57.90	69.70	82.90
	Option II	5,720	Night	35.90	35.90	35.90	35.90
			Day	97.40	65.80	54.00	65.40
			Evening	65.80	54.00	65.80	79.00



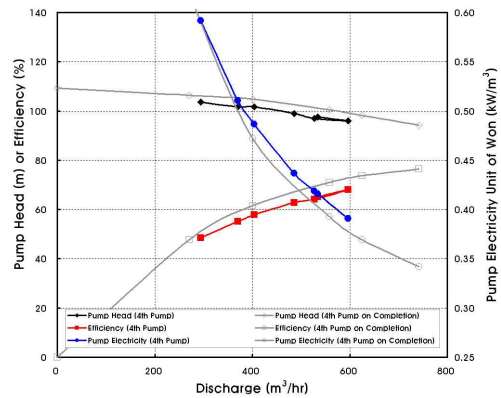
(a) 1st Pump



(b) 2nd Pump



(c) 3rd Pump



(d) 4th Pump

Fig. 3. Pump Efficiency Curve at Yangju Integrated Pumping Station

지의 일평균 수요량은 약 53천 ㎥이며, 용암계통은 45천 ㎥/일(85 %), 백석계통은 8천 ㎥/일(15 %) 규모이다. 용암계통은 용암배수지가 19천 ㎥/일(36 %)로 가장 크며, 다음으로 덕정(19 %), 고덕(17 %), 상패배수지(13 %) 순이다. 분석방법은 계절별, 요일별 수요량 패턴에 큰 차이가 없다는 분석결과에 의거 '07년 8월 6일~12일(1주일간) 운영 자료를 이용, 분석을 실시하였다. 이를 위해 모의에 사용된 배수지 초기저류량(수위)은 '07년 8월 6일자 값을 적용하였다.

적용된 제약조건으로는 관로시설의 안정성 확보를 위해, 배수지 유입관로 설계수량 이상의 용수공급은 불가능하도록 상한제약조건을 설정하였으며, 또한, 용수공급의 신뢰성 확보를 위해 배수지의 하한 저류량(최저수위)은 유사시 3시간 이상의 용수공급이 가능한 물의 양을 보장하기 위해 3, 6, 9 및 12시간의 누계첨두수요량을 Table 5와 같이 구하여 적용하였다. 아울러 배수지 최대 저류량(최고수위)은 여유고 확보측면에서 각 배수지 총 저수용량의 90 %를 초과하지 않는 범위에서 운영하는 것으로 설정하였다.

적용방법은 양주통합가압장의 현재 운영조건은 용암계통에 주 펌프 3대와 별도의 예비 1대, 백석계통에는 주 펌프 2대와 별도의 예비 1대가 설치되어 운영 중에 있어, Table 3을 통해 진단한 문제점 및 장기적 관점의 운영비용 최소화를 위한 펌프확장계획을 고려하여 기설치되어 있는 전체 시설을 활용하는 측면에서 Table 6과 같이 2개의 대안을 적용하였다. 대안-I은 현재 운영조건에서 발생하는 전력소모비용을 모의하고, 대안-Ⅱ는 펌프확장을 고려하여 현재의 시설을 전부 포함하여 가동하는 조건에 대한 전력비용 절감효과를 모의하여 과거 운영실적과 비교하였다. 이때 펌프 운영대수의 조합은 시간별 전력요금의 차이로 인하여 가동과 중단이 반복될 수 있고 같은 시간구간에서는 전력요금의 차이가 없으므로 비용 최소화를 통하여 결정된 송수량을 펌프 및 관로의 용량을 고려하여 평활화시키는 기법을 택하였다.

3.5 비용절감 효과 분석

앞에서 제시된 조건들을 고려하여 양주통합가압장 계통의 펌프-배수지 연계운영을 통한 펌프운전비용 절감 효과분석의 결과는 다음과 같다. 우선 양주가압장의 용암계통은 과거 운영실적은 전력요금체계를 고려하지 않고 심·야 구분 없이 균등하게 펌프를 운영하였으나 대안-Ⅰ 기준에서는 Fig. 4와 같이 주간시간에는 가능한 펌프운영을 억제하는 패턴을 보여주고 있으며, 대안-Ⅱ에서는 심야시간에 공급량을 최대화하고 전력요금이 비싼 주간시간에 공급량은 최소화하는 패턴을 명확히 보여주고 있다. 따라서 용암계통에서는 펌프확장을 고려하여 전체시설을 운영할 경우 비용측면에서 보다 효율적이고 경제적인 운영이 가능할 것으로 분석되었다.

양주가압장의 백석계통에 대한 경우는 단일계통으로서 운영이 용이하여 기존에도 수요량을 감안한 심야전력을 최대한 활용하여 운영하였다. 따라서 Fig. 5와 같이 대안-Ⅰ과 Ⅱ의 결과는 모두 과거실적과 비교하여 큰 차이를 보이지 않아 비교적 효율적으로 운영되고 있음을 알 수 있다.

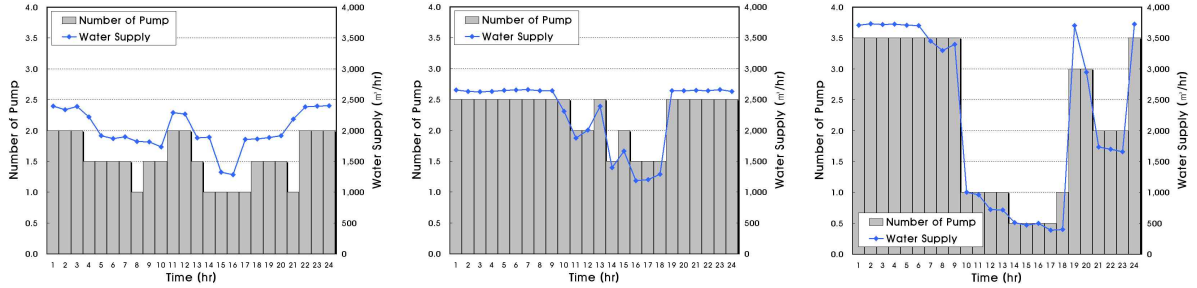
한편 배수지 운영결과는 펌프확장을 고려한 대안-Ⅱ에 대한 결과를 분석하였는데 용암계통 배수지의 시간

Table 5. Accumulated Peak Demand by Sustained Time in Yangju Water Supply System (㎥)

Distinction	Spring	Summer	Fall	Winter
3 hours	11,418	12,080	13,878	10,402
6 hours	18,351	19,739	22,291	18,807
9 hours	26,760	28,936	29,489	26,641
12 hours	34,768	37,028	37,710	35,591
Average	22,824	24,446	25,842	22,860

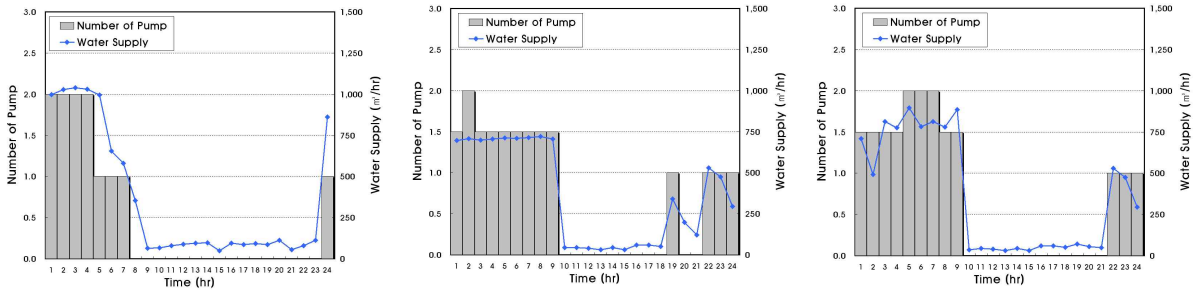
Table 6. Scenarios for comparison with Historical Operation results

Distinction		Scenario Ⅰ (Current Operating Condition)	Scenario Ⅱ (Operation of Spare Pumps)
Yangju Integrated Pumping Station	Yongam Water Supply System Line	2.5 units (64,000 ㎥/day)	3.5 units (89,000 ㎥/day)
	Baekseok Water Supply System Line	2 units (18,000 ㎥/day)	3 units (27,000 ㎥/day)



(a) Current (b) Scenario- I (c) Scenario- II

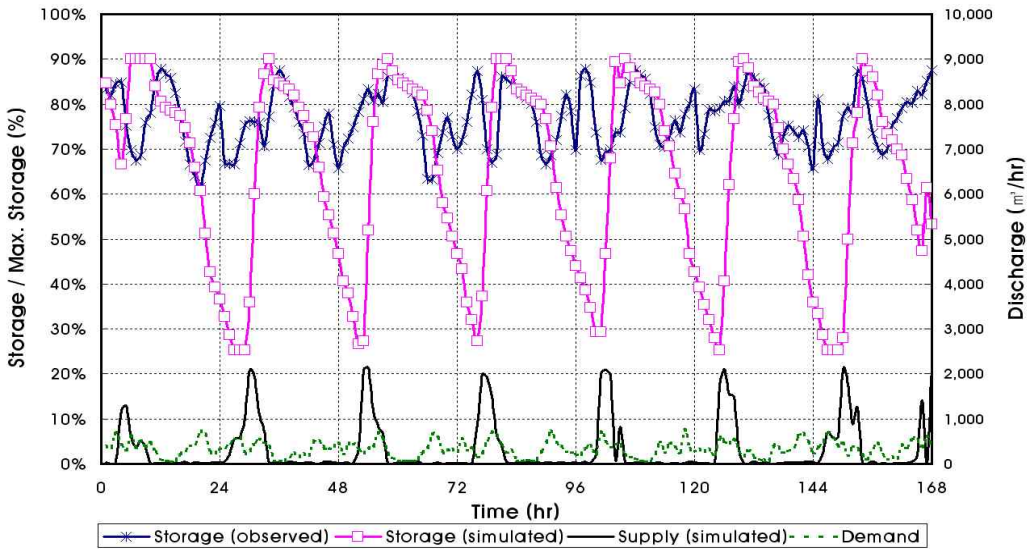
Fig. 4. Result of Pump Operation by Scenarios in Yongam Water Supply System



(a) Current (b) Scenario- I (c) Scenario- II

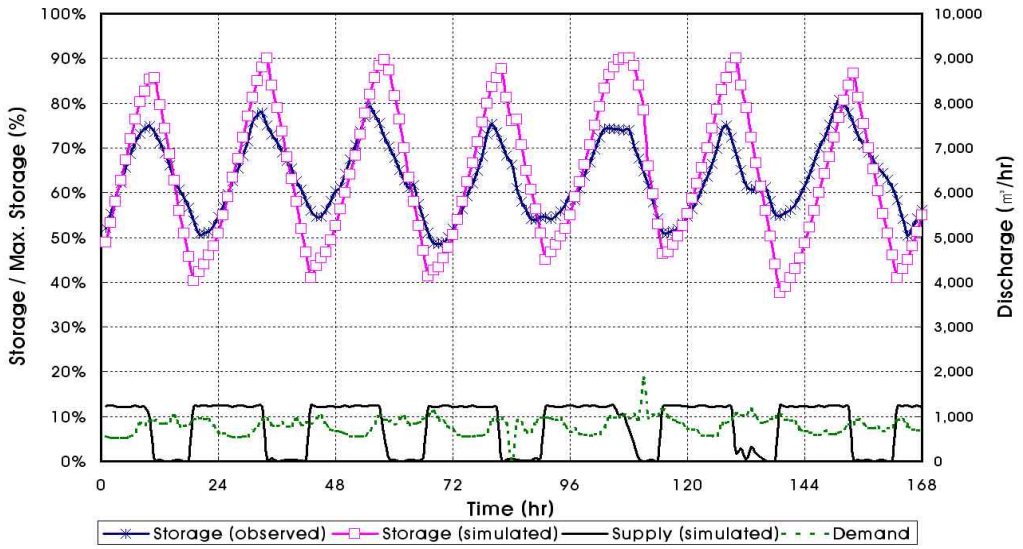
Fig. 5. Result of Pump Operation by Scenarios in Yongam Water Supply System

별 공급량 및 수위변화는 Fig. 6과 같다. 우선 상패배수지의 경우, 기존 배수지 수위가 70~90 % 범위로 배수지의 저수용량 규모를 고려하지 않은 매우 보수적으로 운영되었던 것으로 판단되나, 모의결과는 25~90 % 범위로 나타나 배수지 용량을 보다 효율적으로 활용할 필요가 있는 것으로 나타났다. 덕정배수지와 용암배수지의 경우도 과거에는 각각 45~80 %와 50~70 % 범위에서 운영되어 평균 저류량을 기준으로 일정 부분 제한된 저수용량만을 이용하였으나 대안평가에서는 25~90 %와 35~85 %로 보다 탄력적인 운영을 통하여 비용을 절감하려는 시도가 필요한 것으로 나타났다. 다만 고덕배수지의 경우, 배수지 용량이 작아 최저수위를 3시간 체류시간 이상을 보장해 줄 경우 55~90 % 범위의 고수위로 운영할 필요가 있는 것으로 나타났다. 백석배수지의 경우는 단일계통으로 현재에도 심야전력을 활용하고 있어, Fig. 7과 같이 기존 및 모의결과 운영수위 패턴이 유사하여 기존의 40~80 % 운영범위에서 90 %까지 확대한 운영이 가능하다.

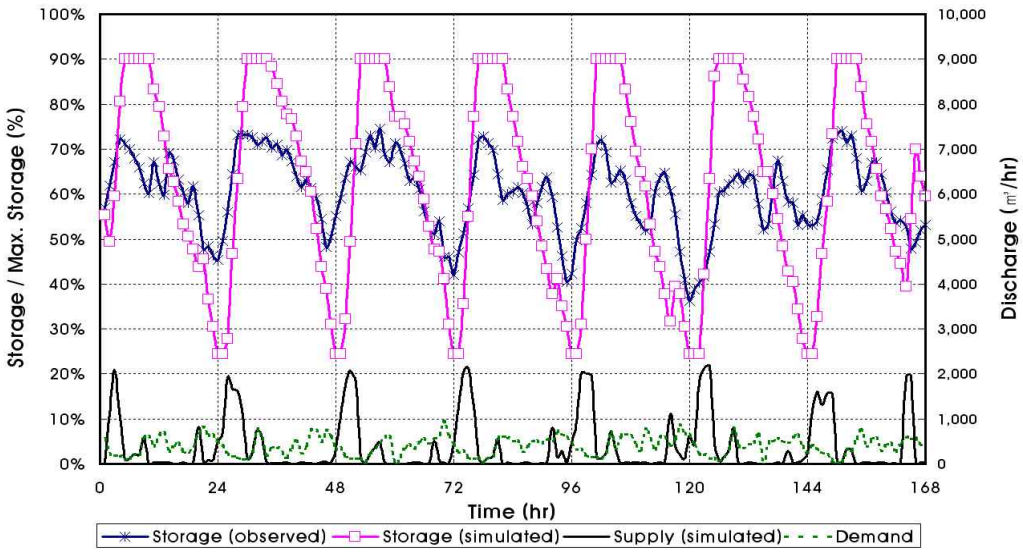


(a) Sangpae Distribution Reservoir

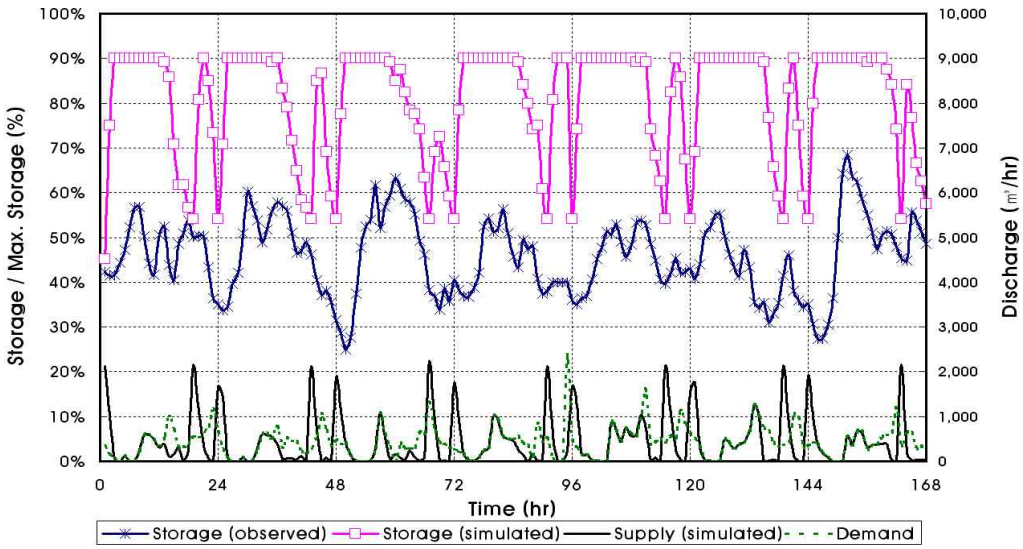
Fig. 6. Storage Pool level in Yongam Water Supply System



(b) Yongam Distribution Reservoir



(c) Deokjeong Distribution Reservoir



(d) Godeok Distribution Reservoir

Fig. 6. Storage Pool level in Yongam Water Supply System (Continued)

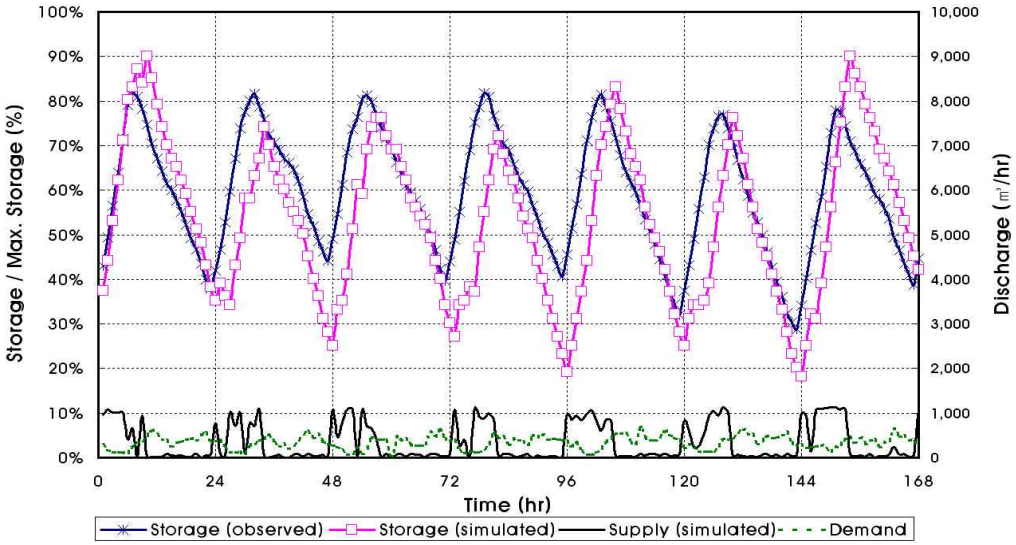


Fig. 7. Storage Pool level in Baekseok Water Supply System

펌프운영대수 조합은 과거에는 주 펌프를 이용하여 심·야 구분 없이 일정량을 보내는 방식이었으나 모의결과는 대안-Ⅰ과 Ⅱ 모두 용암계통은 가능한 심야시간에 모든 설비를 가동하고 낮 시간에는 주 펌프 1대만 가동하며, 저녁시간에는 주 펌프 2대를 운전하는 것이 용수공급의 안정성을 꾀하면서 비용을 가장 적게 하는 조합으로 계산되었다. 백석계통은 현재 송수계통의 용량이 수요량을 크게 능가하고 있어 과거의 운영패턴을 유지하여도 무난한 것으로 분석되었다.

적용결과를 비용절감 측면에서 분석해 보면 Table 7과 같이 기존에 설치되어 있는 모든 시설을 활용하는 측면에서 펌프확장을 전제로 기존시설 전체를 가동 조건으로 한 대안-Ⅱ가 현 조건으로 운영된 대안-Ⅰ에 비하여 전력소모비용의 절감효과가 크게 나타나 설비전반에 대한 평가를 통하여 최적의 대안을 결정할 필요가 있는 것으로 나타났다. 이는 전력요금구조를 최대한 활용하여 심야시간에 배수지에 저류공간을 최대한 활용하여 용수를 공급하는 것이 전체 비용절감 측면에서 유리하기 때문이다. 대안-Ⅱ의 경우 추정된 비용절감액은 배수지의 저류량 하한조건을 3시간 연속 최대수요량으로 할 경우 과거운영 대비 최대 연간 약 84백만원(전체의 17.9 %)의 전력비 절감이 가능한 것으로 분석되었다.

아울러 배수지의 용수보장 신뢰도를 평가한 결과 유사시 용수공급의 안정성 확보를 위해 배수지 최저수위를 체류시간 3시간 이상 확보하는 것으로 검토하였으나, 최저수위값 설정여부가 비용절감에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났다. 적용된 배수지 최소 체류시간(배수지에 저류한 공급 가능 수량을 배수지 전체용량으로 나눈 값)을 3, 6, 9 및 12시간으로 설정하여 민감도를 분석한 결과, Fig. 8과 같이 배수지 체류시간이 작을수록, 즉 배수지 운영 범위가 클수록 전력비 절감효과는 크게 나타나며, 체류시간이 클수록 절감효과는 감소함을 알 수 있다. 상수도설계기준에 따라 1일 최대수요량의 6~12시간을 공급할 수 있는 여유수량을 배수지 운영의 하한조건으로 설정하더라도 6시간 기준으로 연간 약 60백만원, 9시간기준으로는 약 10백만원의 비용절감이 가능한 것으로 나타났다.

따라서, 최적의 배수지 체류시간 산정은 용수공급의 안정성과 시설 운영의 경제성 등을 고려하여 결정되어야 하며, 현대와 같이 수도시설의 유지관리가 잘 이루어지고 있는 상황에서 과도한 용수공급의 안정성은 비용을 급격히 증가시킬 여지가 있다. 또한 향후 신규배수지 건설이나 노후 시설 대체 건설시 전력요금체계에 따른 배수지 규모를 최적으로 결정하는 것이 시설물의 생애주기비용을 최소화할 수 있는 방법 중 하나임을 알 수 있다.

Table 7. Predicted Electricity Costs by Scenarios

Distinction	Electricity Cost		Cost saving (a+b)
	Existing Operation (a)	Optimal Operation (b)	
Scenario Ⅰ	474,906,807 (100 %)	452,326,893 (3.4 %)	22,579,914 (4.8 %)
Scenario Ⅱ	474,906,807 (100 %)	390,025,299 (12.7 %)	84,881,508 (17.9 %)

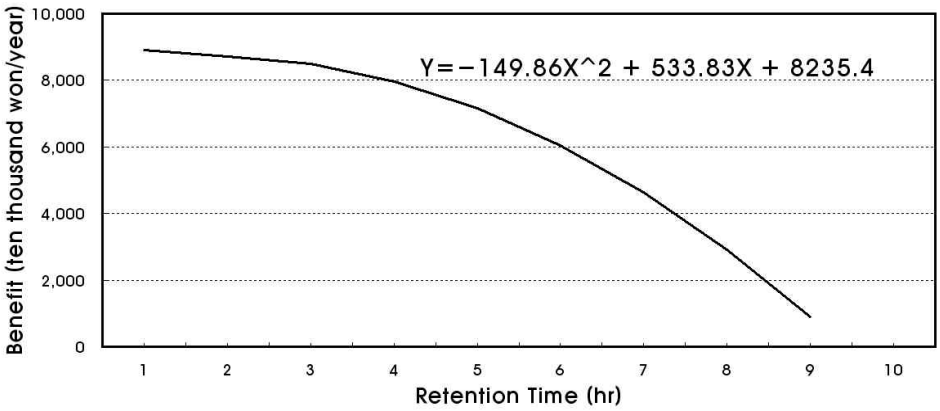


Fig. 8. Analysis of Cost Saving Sensitivity by Retention Time in Storage

4. 결 론

장거리 송수계통에서 가압장의 펌프운영 최적화는 국내·외 사례에서 볼 수 있듯이 비용관리 측면에서 큰 효과를 볼 수 있다. 특히 배수지가 연결되어 있는 경우 용수공급의 안전성 확보는 물론 전력요금체계를 이용한 펌프-배수지 연계운영을 통해 운영효율을 극대화할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 수도권 광역상수도 5, 6단계 중 양주계통의 2개 가압장과 5개 배수지의 문제점 진단과 개선방안 대안개발을 통해 실제 가압장의 펌프가동 운전비용을 최소화하고 배수지의 용수공급 안정성을 확보할 수 있는 방법론을 제시하였다. 적용결과는 배수지의 확장은 비용측면에서 불리하여 예비펌프를 추가 확보하는 대안을 통해 현재의 가용시설 정도로 운영할 경우 3시간 최대 누계 공급량을 배수지 저류량의 하한조건으로 고려할 경우 펌프운전비용을 연간 최대 84.9백만원(전체비용의 17.9 %)을 절감이 가능한 것으로 분석되었으며, 배수지 운영의 안정성을 고려하여 6시간의 공급량을 확보하는 조건에서도 60백만원의 비용절감이 가능하였다. 그러나 9시간 이상에서는 비용절감 효과가 급격히 감소하여 6시간과 9시간 기준의 배수지 하한조건을 대상으로 펌프설치비와 운전비용절감의 Tradeoff를 통해 결정할 필요가 있으며, 용수공급시스템 설계시 생애주기 비용을 고려한 펌프대수 및 배수지 규모에 대한 평가가 반드시 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

건설부 (1985). **상수도시설기준**.

Alla, P. and Jarrige, P.A. (1988). "Optimal control of the West Parisian area water supply network." *Computer Application in Water Supply. Volume 2: Systems Optimization and Control.* Research Studies Press Ltd. pp. 376-391.

Biscos, C., Mulholland, M., Lann, M.V., Buckley, C.A. and Brouckaert, C.J. (2003). "Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP." *Water SA*, Vol. 29, No. 4, pp. 393-404.

Brion, L.M. and Mays, L.W. (1991). "Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* Vol. 117, No. 11, pp. 1-19.

Cembrano, G., Wells, G., Quevedo, J., Perez, R. and Argelaguet, R. (2000). "Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system." *Control Eng.* Practice 8, pp. 1177-1188.

Chase, D.V. and Ormsbee, L.E. (1989). "Optimal pump operation of water distribution system with multiple storage tanks." *Proc. 1990 ASCE Conf.* on Water Resour. Planning and Manage. ASCE, New York, pp. 733-736.

Cohon, J.L. and Marks, D.H. (1975). "A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 208-220.

Creasey, J.D. (1988). "Pump Scheduling in Water Supply: More Than a Mathematical Problem." *Computer Application in Water Supply. Volume 2: Systems Optimization and Control.* Research Studies Press Ltd. pp. 279-289.

Fallside, F., and Perry, P.F. (1975). "Hierarchical optimization of a water supply network." *Proc. of the IEEE.* Vol. 122, No. 2, pp. 387-401.

Hostrup, M., Gani, R., Kravanja, Z., Sorsak, A. and

Grossman, I.,E. (2000). “Integration of thermo-dynamic insights and MINLP optimization for the synthesis, design and analysis of process flowsheets.” *Computers & Chem. Eng*. Vol. 25, pp. 73-83.

Jowitt, P. W., Garett R., Cook, S. and Germanopoulos, G. (1988). “Real-Time Forecasting and Control for Water Distribution.” *Computer Application in Water Supply. Volume 2: Systems Optimization and Control*. Research Studies Press Ltd. pp. 329-355.

Jowitt, P.W. and Germanopoulos, G. (1992). “Optimal pump scheduling in water supply.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 118, No. 4, pp. 406-422.

Labadie, J.W. (1988). *Dynamic programming with the Microcomputer Program CSUDP*, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Co., USA.

Lansey, K.E. and Awumah, K. (1994). “Optimal Operations Considering Pump Switches.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 17-35.

Lansey, K.E. and Zhong, Q. (1990). “A methodology for optimal control of pump stations.” *Proc. 1990 ASCE Conf. on Water Resour., Planning and Manage*. ASCE, New-York.

McCormick, G. and Powell, R.S. (2003). “Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 5, pp. 372-379.

Nakahori, I., Sakaguchi, I. and Ozawa, J. (1978). “An optimum operation of pump and reservoir in water supply system.” *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 6, pp. 478-488.

Nitivattananon, V., Sadowski, E.C. and Quimpo, R.G. (1996). “Optimization of Water Supply System Operation.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 374-384.

Ramos, H. and Covas, D. (1999). “The economical and environmental benefit due to renewable energy production in water supply systems.” *Proceedings of IV Silusba*, pp. 24-26.

Savic, D.A., Walters, G.A. and Schwab, M. (1997). “Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply.” *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1305, pp. 227-235.

Teegavarapu, R.S.V. and Simonovic, S.P. (2002). *Optimal Operation of Water Resource Systems: Tradeoffs Between Modelling and Practical Solutions*. Research Report R3T 2N2. Dept of Civil and Geol. Eng., Univ. of Manitoba, Winnipeg, Canada.

Vieiraa, F. and Ramos, H.M. (2008). “Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study.” *Energy Policy*, Vol. 36, Issue 11, pp. 4142-4148.

Water Research Centre (1985). *Pump Scheduling in Water Supply*, Swindon, Wilshire, U.K.

Yu, T.C., Zhang, T.Q. and Li, X. (2005). “Optimal operation of water supply systems with tanks based on genetic algorithm.” *Journal of Zhejiang University Science*, Vol. 6A, No. 8, pp. 886-893.

Zadeh, L.A., (1963). “Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria.” *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-8, No.1, pp. 59-60.

Zamora, J.M. and Grossman, I.E. (1998). “A global MINLP optimisation algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits.” *Computers & Chem. Eng*. Vol. 22, pp. 367-384.

논문번호: 09-016	접수: 2009.02.06
수정일자: 2009.06.17/08.17	심사완료: 2009.08.17