

광역상수도 계통의 Pump 운전비용 최소화

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

이광만*, 강신욱**, 김수명***

Gwang Man Lee, Shin Wook Kang, Soo Myung Kim

요 지

장거리 용수공급 시스템에서 전력비용은 전체 운영비용의 큰 부분을 차지한다. 본 연구는 시간 단위의 펌프와 배수지 시스템의 최적 운영계획을 수립하기 위해 동적계획기법에 기초한 방법론을 제시하고 있다. 해석방법은 가용 가능한 펌프의 효율적 운전과 전력요금체계, 시간대별 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 적용되었으며, 적용결과는 상당한 수준의 펌프운전비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 방법은 생애주기 비용 최소화 측면에서 실제 용수공급 시설 운영과 대규모 용수공급 체계의 설계 등에 적용이 가능하다.

핵심용어 : 펌프와 배수지 시스템, 연계최적운영, 동적계획기법, 전력비용절감

1. 서 론

광역용수공급 체계의 운영비용은 규모의 크기만큼이나 막대한 에너지와 비용이 소모되고 있다. 현재 6단계까지 완성되어 1일 380만 m^3 의 물을 공급하고 있는 세계적 규모의 용수공급 시스템인 서울과 경기도 지역의 수도권 광역상수 계통도 예외가 아니다. 이와 같은 양의 물을 공급하기 위한 세부시설로는 광역계통에서만 팔당댐에 2개의 취수설비와 816km의 관로, 4개의 정수장, 111개의 배수지 및 12개의 가압장이 운영되고 있다. 이들 시설을 운영하는데 사용하는 전력은 연간 504백만kWh이며 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.

따라서 용수공급을 위한 송수 시스템의 최적 운영관리를 위한 연구는 수도산업에서 매우 중요한 과제중 하나이다. 펌프와 배수지를 포함한 운영관리 문제는 주로 운전비용의 절감과 용수공급의 안전성 그리고 펌프 운영의 합리화를 목표로 한다. 광역용수공급과 같은 복잡한 시스템의 최적 운영 방안을 도출하기 위한 수학적 해석기법은 문제의 특성에 따라 선택적으로 이용이 가능하다. 대표적인 것으로는 Linear Programming, Nonlinear Programming, Mixed Integer Linear Programming, Fuzzy Logic, Dynamic Programming, 그리고 Simulated Annealing(SA) 등이다.

* 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원 · E-mail : lkm@kwater.or.kr

** 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 · E-mail : sukang@kwater.or.kr

*** 한국수자원공사 수도권지역본부 계획차장 · E-mail : soo.myung.kim@gmail.com

이와 같은 이론을 바탕으로 수도시설의 경제적 운영은 수요량 예측을 통한 최적 공급량 결정이 필요하며, 이는 배수지 규모, 펌프운영계획 등을 종합적으로 고려해야만 가능하나 그간 용수공급 시스템을 기술적 평가를 바탕으로 한 최적운영에 대한 연구가 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 수도권 광역상수도 5, 6단계 중 양주계통의 2개 가압장과 5개 배수지의 최적운영을 통해 펌프 운전비용을 절감하고 배수지 운영의 효율을 극대화시킬 수 있는 방안을 저수지 시스템 해석에 적합한 Dynamic Programming을 적용하여 해석하였다.

2. 송수계통(펌프-배수지) 최적 운영

송수계통 운영의 기본은 펌프의 가동률이나 가동 대수의 조절과 배수지의 운전 수위 조정으로 수용가의 수요 변동에 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 계절별 시간대 전력요금에 따라 결정된다. 따라서 변동성이 큰 수요변화에 높은 신뢰도로 대처하면서 펌프 운전을 안정적으로 유지하고 배수지의 유효 저수 용량을 최적으로 활용하여 시스템 전체의 운전비용을 최소화시킬 수 있어야 한다.

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 공급량의 전력소모 원단위에 계절별 시간대별 전력요금을 적용하여 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$OF_1 = Min \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T P_{kt} \cdot U_j \cdot Q_{jt}, k = 1, \dots, Z \quad (1)$$

여기서 P_{kjt} 는 k 계절 t 시간대 전력사용 요금(원)이며, U_j 는 j 가압장의 펌프 전력원단위(kWh/m³) 그리고 Q_{jt} 는 j 가압장에서 t 시간대 공급량(m³)이다.

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

$$OF_2 = Min(Max) (P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_t \cdot \dots \cdot P_T) \quad (2)$$

여기서 P_t 는 운영단계 t 에서 가동한 펌프대수로 시스템은 가능한 펌프운영의 변동성을 적게 하려는 목적을 달성하게 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 시간대에 가능한 많은 양의 송수를 위해서는 배수지 수위가 낮아야 한다. 이 점을 고려한 목적함수는 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$OF_3 = \text{Max}(\text{Min}) \sum_{l=1}^N \sum_{t=1}^T (X_{lt} + Q_{jt}) \quad (3)$$

여기서, X_{lt} 는 l 배수지에서 기간 t 의 초기저류량이며, 이 기간 배수지로 송수될 유량 Q_{jt} 와 더해져 용수공급을 담당하게 된다.

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.

$$\sum_{t=1}^T Q_{jt} \leq D_{\max j} \quad (4)$$

$$Qp_j \geq D_{\max j} \quad (5)$$

여기서 D_{\max} 는 1일 최대 펌핑가능량이며, Qp_j 는 관로의 통수능력이다. 대개 펌프의 펌핑능력은 시간단위로 계산하며 관로 역시 시간단위의 통수능을 알 수 있기 때문에 시간단위 혹은 운영시간 단위로 계산하여 적용할 수 있다.

펌프운전비용중 또 하나의 중요한 요소는 펌프가동방법과 관련이 있다(Savic et al., 1997). 펌프와 배수지로 구성된 용수공급체계에서 펌프의 운전조합이 비용을 얼마나 감소시킬지에 대한 평가는 쉽지 않지만 펌프 스위치의 ON/OFF 횟수가 증가할수록 전력소모도 증가하는 것으로 알려져 있다. Lansley and Awumah (1994)는 펌프 스위치의 ON/OFF 횟수를 제한함으로써 펌프의 유지관리비용을 제한할 수 있다고 하였다. 따라서 적용된 제약조건은 배수지 수위, 배수지 수위변동, 펌프 스위치 ON/OFF 횟수 그리고 전력요금 등 이다.

3. 적용 사례

3.1 시스템 개요

최적화기법을 이용한 상수도 송수계의 펌프와 배수지의 연계 시스템의 운영비용 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 광역상수도과 지방상수가 연계된 시스템으로 체계도는 그림 1과 같다.

표 1 양주통합가압장 시설 현황

구 분		시설용량		예비시설	
		Q(m ³ /일)	펌프	Q(m ³ /일)	펌프
양주통합 가압장	용암계통	64,000	2.5대	25,600	1대
	백석계통	18,000	2대	9,000	1대
용암가압장		30,000	3대	10,000	1대

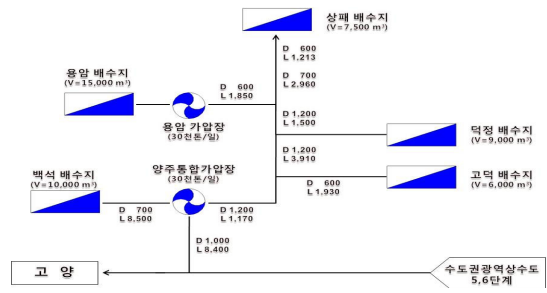


그림 1. 양주통합가압장 계통 송수공급 체계도

3.2 전력요금체계 및 펌프전력원단위

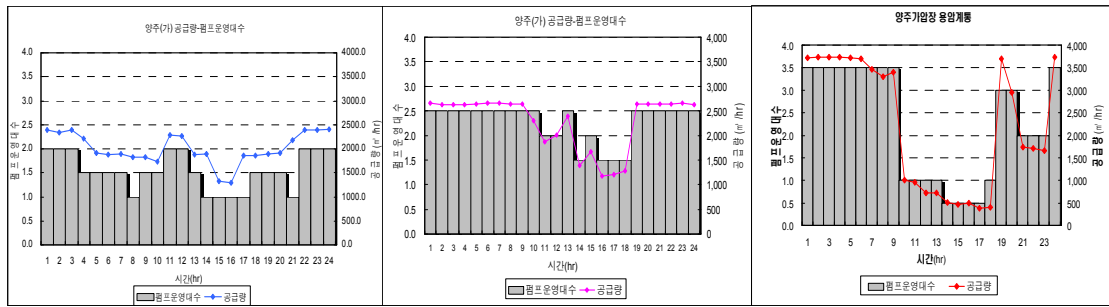
많은 국가에서 전력요금체계를 다원화하고 있는데 계절적 시간대별 수요를 감안하여 전력사용량이 적은 시간대의 값을 낮추어주는 형식이다. 우리나라도 2008년 11월 13일 고시된 전력요금체계에 따르면(표 3은 산업용전력(을)의 경우) 계절별로 여름철, 봄·가을철 그리고 겨울철 3개 구간으로 나누고 시간대별로는 심야, 주간 그리고 저녁으로 구분하고 있다. 요금은 전력사용이 적은 심야시간대에는 계절적 차이를 두지 않고 가장 낮은 값을 책정하였으며, 주간시간대에는 여름철이 높고, 저녁시간대는 겨울철이 높은 구조를 취하고 있다(봄·가을철은 저녁 > 주간 > 심야, 여름철은 주간 > 저녁 > 심야 그리고 겨울철은 저녁 > 주간 > 심야 순으로 저렴).

3.3 모형의 적용

시스템 운영평가를 위한 목적함수는 제2장에서 제시된 식 (1)을 기본으로 하고 배수지의 하한 저류량을 제약조건으로 처리하는 기법을 적용하였다. 이때 펌프 운영대수의 조합은 시간대별 전력요금의 차이로 인하여 가동과 중단이 반복될 수 있고 같은 시간대에서는 전력요금의 차이가 없으므로 비용 최소화를 통하여 결정된 송수량을 펌프 및 관로의 용량을 고려하여 평활화시키는 기법을 택하였다. 적용방법은 양주통합가압장의 현재 운영조건은 용암계통에 주 펌프 3대와 별도의 예비 1대, 백석계통에는 주 펌프 2대와 별도의 예비 1대가 설치되어 운영 중에 있어, 전체시설을 활용하는 측면에서 표 5와 같이 2개의 시나리오를 개발하였는데 시나리오 I은 현재 운영조건에서 발생하는 전력소모비용을 모의하고, 시나리오 II는 예비펌프를 추가하여 가동하는 조건에 대한 전력비용 절감효과를 모의하여 과거 운영실적과 비교하였다.

3.4 비용절감 효과 분석

앞에서 제시된 조건들을 고려하여 양주통합가압장 계통의 펌프-배수지 연계운동을 통한 펌프 운전비용 절감 효과분석의 결과는 다음과 같다. 우선 양주가압장의 용암계통은 과거 운영실적은 전력요금체계를 고려하지 않고 심야 구분없이 균등하게 펌프를 운영하였으나 시나리오 I 기준에서는 그림 3과 같이 주간시간대에는 가능한 펌프운동을 억제하는 패턴을 보여주고 있으며, 시나리오 II에서는 심야시간대에 공급량을 최대화하고 전력요금이 비싼 주간시간대의 공급량은 최소화하는 패턴을 명확히 보여주고 있다. 따라서 용암계통에서는 예비 펌프를 포함하여 가압장을 운영할 경우 펌프운전 및 비용측면에서 보다 효율적이고 경제적인 운영이 가능함을 알 수 있다.



(a) 기존운영패턴

(b) 시나리오 I

(c) 시나리오 II

그림 3. 용압계통 사나리오별 펌프운영 결과

적용결과를 비용절감 측면에서 분석해 보면 표 2과 같이 기존에 설치되어 있는 모든 시설을 활용하는 측면에서 예비펌프를 가동 조건으로 한 시나리오 II가 현 조건으로 운영된 시나리오 I에 비하여 전력소모비용의 절감효과가 크게 나타났다. 이는 전력요금구조를 최대한 활용하여 심야 시간에 배수지에 저류공간이 있는 한 가능한 많은 양을 펌핑하기 때문이다. 시나리오 II의 경우 추정된 비용절감액은 배수지의 저류량 하한조건을 3시간 연속 최대수요량으로 할 경우 과거운영 대비 연간 약 84백만원(전체의 17.9%)의 전력비 절감이 가능한 것으로 분석되었다.

표 2. 시나리오별 전력소모비용

(단위: 원/연간)

구 분	전력비		절감액(a+ b)
	기존운영시(a)	최적운영시(b)	
시나리오 I	474,906,807 (100%)	452,326,893 (3.4%)	22,579,914 (4.8%)
시나리오 II	474,906,807 (100%)	390,025,299 (12.7%)	84,881,508 (17.9%)

4. 결 론

장거리 송수계통에서 가압장의 펌프운영 최적화는 영국 등 선진국의 사례에서 볼 수 있듯이 비용측면에서 큰 효과를 볼 수 있다. 특히 배수지가 연결되어 있는 경우 용수공급의 안전성 확보는 물론 전력요금체계를 이용한 펌프-배수지 연계운동을 통하여 효율을 극대화하는 전략이 필요하다. 본 논문에서는 수도권 광역상수도 5, 6단계 중 양주계통의 2개 가압장과 5개 배수지 최적운영을 통해 실제 가압장의 펌프가동 운전비용을 최소화하고 배수지의 용수공급 신뢰도 및 펌프조합의 안전성을 달성할 수 있는 방법론을 제시하였다. 적용결과는 양주통합가압장 계통의 가용 시설을 모두 이용하여 운영할 경우 현재 지불하고 있는 비용의 18% 수준인 연간 약 9천만원 전력 비용절감이 가능한 것으로 분석되었다. 이는, 과거 단독운영과 비교시 광역-지방상수도간 연계운영에 따른 효과로서 수도시설의 권역별 통합운영을 통한 비용절감 방안이 마련되어야 하며, 용수 공급시스템 설계시 생애주기 비용을 고려한 펌프대수 및 배수지 규모의 결정이 필요한 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Lansey, K.E. and Awumah, K. (1994). "Optimal Operations Considering Pump Switches." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(1), pp.17-35.
2. 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.