

다목적 분석 기법을 이용한 상수도 송수계의 펌프와 배수지의 연계 최적 운영

0

고 석 구 * , 오 민 환 **

* ** 한국수자원공사 수자원연구소

Application of a Multiobjective Technique for Optimum Operation of Pumps and Reservoirs in Service Water Transmission Systems

Seok - Ku Ko * Min - Hwan Oh **

* ** Korea Water Resources Corporation
Water Resources Research Institute

ABSTRACT

A multiobjective analysis technique was applied for the optimum operation of pumps and reservoirs in service water transmission systems. Three major objectives were identified and assessed on the normally operating service water transmission systems. They are, 1) stability of pump operation; 2) economic point of view in minimizing the energy cost for pumping; 3) reliability in meeting the stochastically varying demands. The measures of these objectives were required times of pump on-offs in stability, required total energy cost in economics, and minimum required storage during the operating horizon in reliability.

In order to find the best meeting solution to the decision maker, a set of non-dominated solutions which show the tradeoff relationships between the considering objectives were generated. The DM selects the best solution from this explicit tradeoff relationships using his heuristic decision rules or experience.

The theory was verified by applying to the Kumli Service Water System. A combined technique of the ϵ -constraint and the weighting methods was used to generate the nondominated solutions, and the dynamic programming algorithm was applied to find the optimal solution for the discretized multi-objective analysis problems.

1. 서론

최근 도시 기능의 고도화에 따라 생활 용수 및 공업용수의 수요가 급증하고 있을 뿐 아니라 오염화 문제로 취수원이 제한되어 상수도 시설이 대규모화 하고 공급지역 또한 광역화 되고 있어 한 시스템에서 많은 량의 물을 수송하는 추세에 있다. 용수의 송수 방식은 하천을 포함하는 개수로에 의한 중력 수송과 관로에 의한 압력 수송으로 분류되며, 우리나라와 같은 지형적 여건에서 많은 량의 용수를 장거리 수송하기 위해서는 관로에 의한 압력 수송이 불가피하다. 관로에 의한 송수 시설에서는 수용가의 수요량 변화를 흡수하기 위한 완충 장치로 관로와 관로 사이에 저수지를 설치 운영하고 있으며 관로에 의한 상수도 송수 단계의 구성 요소인 펌프 운전의 안정성 등에 직접적인 영향을 주기 때문에 그 제어 및 운영 계획의 필요성이 높아지고 있다.

상수도 송수 시스템의 경제적인 운영에 대하여 Fallside와 Perry(1957)가 비용 절감을 위한 정식화를 시작한 것을 계기로 清水(1976) 및 小畑(1977)는 동적 계획 기법을 적용하였으며, 大瀧(1979)는 2 Level의 Decomposition 기법을 적용해서 최적화 문제에 따른 계산량을 축소시켰다.

지금까지의 연구 방법들이 대부분 경제성 문제에 목적 함수를 둔 단일 목적 함수에 국한되고 있으나, 실제 운영에 있어서는 송수 에너지 비용에 따른 경제성 뿐 아니라 펌프의 가동율이나 가동 대수 변동에 따른 안정성과 저수지의 최적 확보 저수량등의 신뢰성 문제를 함께 고려하여야 한다. 이러한 문제는 2개 이상인 Vector형태의 목적을 갖는 다목적 최적화 문제(Cohon 및 Marks, 1975)로써, 다목적 최적화 기법에 의거 Nondominated 解群을 구한 후 시스템 기술자나 의사 결정권자의 입장에서 여러 목적이 동시에 가장 잘 달성되었다고 보는 해를 운영 계획에 사용하여야 한다. 다목적 분석 기법 중 각 목적간 Explicit Tradeoff 관계를 제공하여 주며 가장 보편적으로 이용되는 Weighting 기법(Zadeh, 1963)과 ϵ -제약 기법(Haines 등, 1971)의 혼합 형태를 사용하였으며 최적화 문제는 동적 계획 기법을 적용하였다.

다목적 분석 기법에 의한 상수도 송수계의 최적화 문제의 유용성을 검증하기 위해서 한국 수자원공사에서 운영 관리하고 있는 구미 송수 시스템에 적용하여 실제운영 결과와 비교하였다.

2. 송수계의 펌프와 배수지의 연계 운영

2. 1 송수계 운영의 다목적 함수

상수도 송수 시스템의 구성 요소로는 펌프와 저수지가 있으며 상호 연계 운영하고 있다. 운영의 기본은 펌프의 가동율이나 가동 대수의 조절과 저수지의 운전 수위 조정으로 수용가의 수요 변동에 대처하며, 펌프 운전에서 따른 시스템 안정성의 증대와 시스템 운전에서 필요한 에너지 비용의 절감이다. 시스템의 안정성은 각 펌프의 운전 상태 변화의 최소화이며, 에너지 비용은 펌프의 최적 효율에 적합한 운전성과 펌프 수두 및 전력 사용 시간에 따른 에너지 가격에 따라 결정된다. 따라서 수요 변화에 높은 신뢰도로 대처하면서 펌프 운전을 안정적으로 운영하고 저수지의 유효 저수 용량을 최적 활용하여 운전 비용을 최소화 시킬 수 있어야 한다.

한편 펌프의 운영 측면에서 보면 펌프 유량을 가급적 일정하게 유지하는 것이 요망되며, 이렇게 되면 용수 수요의 일 변화를 저수지의 유효 저수 용량으로 흡수하여야 하므로 저수지의 수위 변동은 커지게 될 뿐 아니라 높은 수두에 따라 에너지 사용이 증가되고 심야 전력등 시간대에 따른 산 전력을 집중 사용할 수 없게 되어 비용이 증가하게 된다. 반대로 에

너지 비용 측면에서는 저수지 수위를 낮게 유지하면서 용수 수요에 맞추어 펌프 가동률이나 가동 대수로 수요 변화에 적응하여야 하며, 전력 단가가 낮은 시간대에 펌프 가동을 증대시켜 저수지에 저류하게 되므로 펌프의 안정성은 떨어지게 된다. 과거의 경험이나 예측으로 일간 시간별 용수 수요는 어느 정도 예측할 수 있지만 추계학적 성질을 포함하고 있어 예측하지 못했던 수요 변화에 대처하기 위한 신뢰성의 증대는 저수지의 잔여 저류량이나 펌프 가동 증대로 해결할 수 있다. 그러나, 펌프의 운전성에 있어서도 추계학적 성질이 있어 신뢰성 문제는 저수지의 잔여 유효 저수 용량으로 볼 수 있다.

이러한 세 가지 목적을 동시에 고려하는 다목적 최적화 문제에 있어 목적 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \min [F_1, F_2, F_3] \quad (2.1)$$

송수 시스템이나 저수지 운영 문제와 같은 시계열 분석 문제에 있어서 일반적으로 두가지 형태의 목적 함수를 생각할 수 있다. 첫째는 누계형 목적 함수로써 예를 들면 분석 기간중 전체 기간에 소요되는 에너지라든가 운전 비용등을 고려할 수 있고, 둘째는 min(max) 또는 max(min)의 목적 함수로써 펌프 가동 대수 변화의 최소화라든가 기간중 최대 사용 전력의 최소화등의 문제등이 있다. 상기에서 고려한 경제성, 안정성, 신뢰성등 세가지 목적 함수를 각 목적 별로 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M c_t \cdot g(Q_{jt}, X_{it}, X_{it+1}); i=1, \dots, L \quad (2.2)$$

$$F_2 = \min(\max) [ABS(\sum_{j=1}^M Q_{jt} - \sum_{j=1}^M Q_{jt-1}); t=1, \dots, T \quad (2.3)$$

$$F_3 = \max(\min) (X_{it}); t=1, \dots, T; i=1, \dots, L \quad (2.4)$$

여기서,

- F_1 : 기간 중 송수에 따른 전체 전력 비용
- F_2 : 기간 중 펌프 용량의 최대 변화 값
- F_3 : 기간 중 저수지에 남아 있는 최소 저수량
- $g(\cdot)$: 펌프의 에너지 사용 함수 (송수량 및 수두의 함수)
- c_t : 에너지 단가 (시간의 함수)
- X_{it} : 기간 t 초기에 있어 i 저수지의 저류량
- Q_{jt} : 기간 t 동안의 j 펌프의 송수량
- T : 이산화 된 분석기간의 수
- L : 저수지의 수
- M : 펌프의 수

이렇게 세 가지 목적을 갖는 송수 시스템의 다목적분석은 동적 특성이 서로 다른 목적 함수를 동시에 고려하여야 한다.

2.2 송수계 운영의 제약 조건

상수도 송수 단계는 펌프와 저수지가 상호연계 운영되고 각기 여러개가 병렬로 연결 운영되므로 운전의 안정성을 높이고 있다. 이러한 시스템의 운영에 있어 일반적인 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^L (X_{it+1} - X_{it}) = \sum_{j=1}^M Q_{jt} - \sum_{k=1}^M D_{kt}; t=1, \dots, T \quad (2.5)$$

여기에서, D_{kt} 는 기간 t 동안의 k 번째 수요단의 물의 사용량을 나타내고 그 밖의 변수는 앞 절에서 정의 한 바와 동일하다. 그밖에 고려하여야 하는 제약 조건으로써는 각 저수지의 저류 용량과 각 펌프 송수량의 상한 및 하한 값의 제약이다.

$$X_i \min \leq X_{it} \leq X_i \max; t=1, \dots, T; i=1, \dots, L \quad (2.6)$$

$$Q_j \min \leq Q_{jt} \leq Q_j \max; t=1, \dots, T; j=1, \dots, M \quad (2.7)$$

펌프를 대수 제어할 경우의 Q_{jt} 는 이산적 밖에 취할 수 없지만 펌프의 특성상 가동률로써 제어할 수 있는 범위가 주어져 있어 상한 값과 하한 값을 갖게된다.

3. 문제해법

3.1 Nondominated 解群의 발생

Nondominated 解는 Noninferior해라고도 하며 다목적 함수 문제에 있어서 다른 하나 또는 여러개의 목적 함수 값을 감소시키지 않고는 한 목적 함수 값을 개선할 수 없는 解를 말한다(Goicoechea 등, 1982).

다목적 분석 기법에 대하여 Cohon 및 Marks (1975)와 Goicoechea 등, (1982)은 의사결정 과정에 제공 되는 방법에 따라 그 방법을 네 가지로 구분 하였는데,

- (1) Nondominated 解群의 發生 기법
- (2) 사전 의사 전달에 따른 연속 기법
- (3) 사전 의사 전달에 따른 이산화 기법
- (4) 순차적 의사 전달 기법 이다.

각 기법들에 대한 장 단점이나 적용 범위 등은 문헌에 명시되어 있으므로 여기에서는 의사 결정을 위하여 각 목적간의 상호 배분 관계를 직접적으로 제시해 주는 Nondominated 解群 발생 방법 중 Weighting 기법(Zadeh, 1963)과 ϵ -제약 기법(Haimes 등, 1971)의 혼합형 기법을 이용하였다.

Weighting 기법은 각 목적 함수에 적절한 가중치를 부여하여 다목적 함수를 단일 목적 함수로 변환 한 후 최적해를 구하되, 각 목적의 가중치를 매개 변수처럼 변화 시키면서 Nondominated 解群 을 구한다. 그러나 ϵ -제약 기법에서는 한 개의 목적 함수 만을 남겨 놓고 모두 제약 조건으로 변환 한 후 단일 목적 함수의 최적 해를 구하되, 변환 된 제약 조건의 제약 범위를 매개 변수로써 변화 시키면서 다목적 함수의 Nondominated 解群을 구한다.

앞에서 고려한 송수 시스템의 신뢰성을 고려하는 제 3 목적 함수인 식 (2.4)는 저류량의 최소값을 부여함으로써 ϵ -제약 기법에 의거 제약 조건으로 변환하고 펌프 에너지 사용에 따른 경제성 문제와 펌프 가동의 안정성 문제는 Weighting 기법에 의거 단일 목적 함수로 변환 하였다. 저수지 운영 문제와 같은 시계열 분석 문제에 있어 Weighting 기법을 적용 할때에도 동일 형태의 동적 특성을 갖아야만 되기 때문에 min(max) 형태의 펌프 안정성 문제의 목적 함수인 식 (2.3)을

등가의 누계형으로 변환 하면 목적 함수와 제약 조건들은 다음과 같다.

$$F = \min \left\{ \sum_{t=1}^T (W_1 F_1 + W_2 F_2) \right\} \quad (3.1)$$

$$F_1 = \sum_{j=1}^M C_t \cdot g(Q_{jt}, X_{it}, X_{i,t+1}); i=1, \dots, L \quad (3.2)$$

$$F_2 = \sum_{j=1}^M (Q_{jt} - Q_{j,t-1})^2 \quad (3.3)$$

Subject to:

$$c_{it} \leq X_{it} \leq X_{i \max}; t=1, \dots, T; i=1, \dots, L \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^L (X_{i,t+1} - X_{it}) = \sum_{j=1}^M Q_{jt} - \sum_{k=1}^M D_{kt}; t=1, \dots, T \quad (3.5)$$

$$X_{it} \leq X_{i \max}; t=1, \dots, T; i=1, \dots, L \quad (3.6)$$

$$Q_{jt \min} \leq Q_{jt} \leq Q_{jt \max}; t=1, \dots, T; j=1, \dots, M \quad (3.7)$$

여기서 사용된 부호는 앞에서 사용된 바와 모두 같다. 다만 W_1 과 W_2 는 경제성과 안정성의 목적 함수에 대한 매개 변수인 가중치이며, c_{it} 는 매개 변수으로써 각 저수지의 최소 저류량을 나타낸다. c_{it} 가 식 (2.2)의 $X_{i \min}$ 과 다른점은 저수지의 물리적인 최소 저류량의 의미가 아니라 신뢰성을 나타낼 수 있는 필요 최소 저류 상태를 나타낸다.

따라서 식 (3.1)의 가중치와 식 (3.4)의 ϵ -제약의 최소값을 변화시키면서 최적화 문제를 동적 계획 기법이나 선형 계획 기법 등을 적절한 알고리즘을 반복적으로 적용함으로써 Nondominated 解群을 發生 시킬 수 있다. 발생된 解群 중에서 시스템 기술자나 의사 결정권자의 입장에서 가장 이상적이라고 판단되는 안을 다목적 분석 문제의 최적해로 본다. 여러 안 중에서 최적안을 찾는 문제는 간단한 경우는 통찰력에 의해서 해결 되지만 복잡한 문제는 다목적 의사 결정 기법등 (Goicoechea 등, 1982) 의 적용이 필요하게 된다.

3.2 동적 계획 기법의 적용

동적 계획 기법은 R. Bellman (1957)에 의해서 창안 되었으며, 의사 결정이 시간에 따라 순차적으로 결정되는 다단계 분석을 위한 동적 특성이 이론적으로 가장 적합하다. 이 기법은 목적 함수나 제약 조건이 선형이든 비선형이든, 또는 연속이나 비연속이나 어떠한 조건하에서도 최적해를 제시해 줄 수 있기 때문에 널리 사용되고 있는 기법 중의 하나이다. 그러나 계산 요구량이 상태 변수의 수에 따라 지수 함수적으로 증대되기 때문에 다차원 분석 문제에 있어서는 계산상의 어려움이 있다.

Nondominated 解群 구하기 위하여 앞에서 변환된 최적화 문제의 목적 함수 요소중 경제성 문제에 있어 펌프 송수에 의한 사용 에너지는 관로의 손실 수두 등을 포함하고 있어 비선형이며, 펌프의 안정성 문제도 식 (3.3)에서도 같이 비선형이다. 또한 여러개의 저수지가 병렬로 연결되어 있다고 볼 것으로서 비선형의 다 차원 분석 최적화 문제를 볼 수 있다. 그러나 상수도 송수 시스템에 있어 병렬로 연결된 저수지들은 별개로 운영되지 않고 각 저수지를 동일한 저류 상태로 운영하는 것이 일반적이기 때문에 평형 운영을 (balanced

operation rule)에 따라 1 개의 시스템으로 볼 수 있어 1차원 문제로 쉽게 변환할 수 있다.

각각 병렬로 연결된 여러개의 펌프와 저수지가 포함된 상수도 송수 시스템의 최적화 문제는 시간의 단계에 따라 순차적으로 분석이 요구되는 시계열 문제 이고 목적 함수가 비선형이면서도 상태 변수인 여러개의 저수지 문제를 1차원 문제로 쉽게 변환할 수 있어 동적계획기법의 적용이 보다 이상적으로 판단된다.

4. 적용 사례

4.1 적용 개요

다목적 분석 기법을 이용한 상수도 송수계의 펌프와 배수지의 연계 최적 운영 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 한국 수자원공사에서 운영 관리하고 있는 구미 용수 관리 사무소의 송수 시스템에 적용하였다. 구미 상수도 시스템은 인근 지역에 일일 15 만 m^3 를 공급할 수 있도록 계획되었고 1200 mm의 관로 5400 m에 의해서 취수 펌프장으로 부터 저수 용량 5739 m^3 의 배수지 3 개와 연결되어 운용되고 있으며 기타 송수 시스템의 구성도와 주요 제원은 그림 1 과 표 1 에 나타나 있다.

구미 시스템은 600 마력의 송수 펌프 4 대에 의해서 구미 시의 생활 및 공업용수를 공급하고있어 송수에 따른 전력비가 비용의 대부분을 차지하고 있다. 용수 수요가 적은 심야 전력 요금은 철두 전력의 55 % 수준으로써 배수지의 유효 저수 용량을 활용하여 전력비를 감축할 수 있으나 저수지 수위 상승에 따른 高水頭 문제와 펌프의 가동 대수 제어에 따른 안정성 문제가 따른다. 또한 유효 저수 용량의 최대 활용은 다시 말해서 저수 용량이 최소가 되었을 경우 예측하지 못한 수요 증대에 따라 신뢰성 문제를 야기할 수 있다. 송수 시스템의 실제 운영에 있어서는 이러한 세 가지의 목적을 동시에 고려하여 최상의 해를 찾아야 한다.

표 1 구미 송수 시스템의 주요 특성 자료

구 분	단 위	특 성	
1. 송수 펌프	대 수	4	
	전동기 효율	%	95.1
	펌프효율	%	81.0
	최대양정	m	52.3
	대당최대펌프량	m^3/min	46.3
	유량조절범위	"	28.2 - 46.3
	취수평균수위	EL. m	31.4
2. 송수 파이프	직 경	mm	1200
	길 이	m	5400
	재 질		주철관
3. 배수지 (3지)	총 저수용량	m^3	17,217.5 ($m^3/3지$)
	유효저수용량	m^3	15,942.2 ($m^3/3지$)
	고수위 (HWP)	EL. m	72.80
	저수위 (LWL)	"	67.80
	규 격	m	W24.1xL44.1xH5.4
4. 시간대 별 전력량 단가	06시 - 18시	원/KWH	35.60
	18시 - 22시	"	44.20
	22시 - 06시	"	24.30

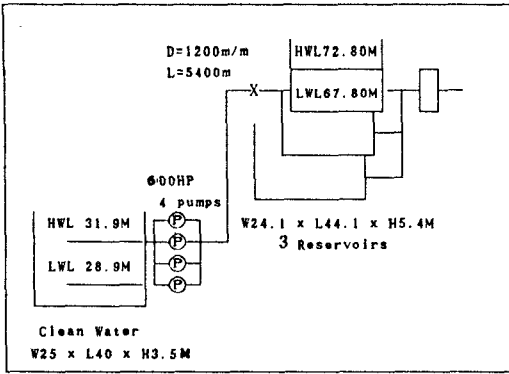


그림1. 구미 송수 시스템 구성도

구미 상수도 시스템은 1984년 부터 가동을 개시한 이래 수요가 증가 추세에 있으며, 모형의 검증에 사용된 시간대별 수요량은 1991.5.23일의 실제 공급 실적으로 표 2와 같다.

표2 구미 상수도 시스템의 일일 용수 수요량(단위: m³)

시간	수요량	시간	수요량	시간	수요량	
1	4928	9	5335	17	5061	
2	4845	10	5435	18	5257	
3	4736	11	5532	19	5357	
4	4692	12	5371	20	5312	
5	4710	13	5318	21	5170	
6	3859	14	5220	22	5275	
7	4986	15	5119	23	5429	
8	5297	16	5076	24	5343	
* 1991. 5. 23 자료					계	122663

4. 2 구미 시스템의 다목적 분석

시스템에서 고려한 위의 세 가지 목적 중 경제성 문제는 물 공급에 의한 펌프 사용 전력과 시간대에 따른 전력 요금의 함수이며 펌프의 소비 전력은 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=1}^M 0.002724 \frac{Q_i h}{\phi_1 \phi_2} \quad (4.1)$$

여기서, Q_i 는 시간대별 i 펌프의 송수량(m^3)이며; h 는 펌프의 총 소요 수두(m)로써 순양정과 관로등의 손실 수두 및 관로 말단에서 소요 수두의 합이다. 또한 M 는 펌프의 대수이며 W 는 시간대별 사용 에너지 (KWH)이고 ϕ_1 및 ϕ_2 는 전동기 및 펌프의 효율이다.

Nondominated 해를 구하기 위해서 Weighting 기법과 ϵ -계약 기법의 혼합형을 사용하였다. 경제성 문제와 펌프의 안정성 문제에 대하여는 가중치를 부여하여 이 가중치들을 변화시키고 신뢰성인 분석 기간 중 최소 저류량을 변화시키면서 1차원 동적 계획 기법에 의해서 최적화 문제를 풀었다. 이러한 방법으로 Nondominated 解群을 발생시켰으며 각 목적간의 직접적인 상호 배분 관계를 나타내는 Tradeoff 다이어그램이 그림2에 나타나있다.

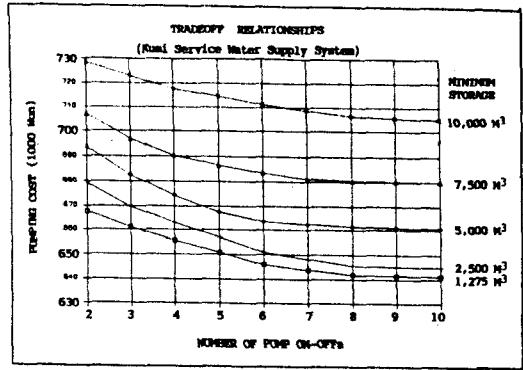


그림 2 Tradeoff 다이어그램

그림2에서 알수 있듯이 펌프 가동의 개폐 횟수가 최소 저류량에 따라 4 - 6 회 일때 폭선의 기울기가 변화 함을 알 수 있다. 이러한 개폐 횟수의 값을 경제성과 안정성을 구분하는 한계값 (marginal value)으로 볼 수 있다.

따라서 펌프 운전의 안전성을 나타내는 지표인 기간 중 펌프 가동의 개폐 횟수 4 - 6 회가 경제성 지표인 기간 중 전력비 증감 비율의 한계값 (marginal value)의 범위이나 펌프의 한계 개폐 횟수가 신뢰성 지표인 기간 중 저수지의 최소 저류량에 따라 변화한다. 그림의 우단으로 가면 경제성만을 고려한 것이고 좌단으로 가면 경제성 대신에 펌프의 안정성을 고려한 것이다. 또한 그림의 상단 부분은 신뢰성을 더욱 고려함을 나타낸다.

표3 최소 저류량에 따른 한계 개폐 횟수 및 전력비

신뢰성 (최소 저류량)	안정성 (펌프 개폐)	경제성 (최소 전력비)
1,275	6 /일	646.0천원/일
2,500	6 /일	651.0 "
5,000	5 /일	667.5 "
7,000	4 /일	690.5 "
10,000	4 /일	717.5 "

표3에는 구미 송수 시스템의 다목적 연계 최적 운영을 위해서 Nondominated 解群 중 신뢰성인 최소 저류량에 따라 신뢰성인 펌프 개폐 횟수 및 경제성인 전력비에 대한 한계값이 나타나 있으며, 실제 운영을 위해서는 이러한 값 중에서의 의사 결정을 위한 시스템 기술자의 입장에서 최상의 안을 선택하여야 한다.

4 - 3 계산 결과 분석

구미 송수 시스템의 1991년 5월 20일 부터 5월 26일 까지 1주일 동안의 운영 실적에서는 총 142,644 KWH의 전력을 사용하였으며 이에 대한 전력비는 4,668.4 천원에 상당한다. 이 기간 동안의 신뢰성 지표인 최저 저류량은 4200 m^3 이었으며 90% 신뢰도에 상당하는 저류량은 5250 m^3 이었다. 기간 중 각 펌프의 총 개폐 횟수는 40 회로 일일 평균 5.7 회에 상당한다.

개발된 모형에 의한 다목적 분석을 실시하되 신뢰도를 나타내는 최저 저류량은 과거의 실적과 가장 유사한 5000 m³를 선택하고 이에 상당하는 다목적 분석 결과가 표4의 대안 I 에 나타나있다. 이로부터 대안 II 는 대안 I 과 신뢰성에서는 동일인 수준이지만 경제성과 안정성과의 Tradeoff를 나타내며, 대안 III 은 대안 I 과 안정성에서는 동일인 수준이지만 신뢰성과 경제성과의 Tradeoff를 나타낸다.

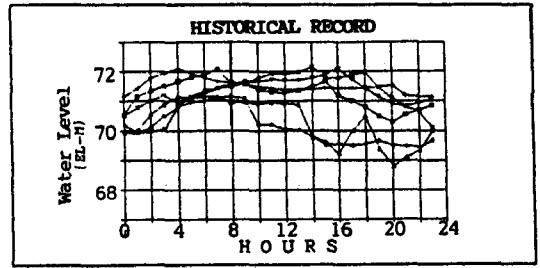
표4 과거 실적과 다목적을 고려한 운영 대안

구 분	과거실적	대안 I	대안 II	대안 III
1. 신 퇴 성				
· 최저 저류량(m ³)	4,200m ³	5,000	5,000	2,500
· 90% 보장 저류량	5,250m ³	5,500	5,125	2,750
· 평균 저류량	10,500m ³	7,750	7,000	5,000
2. 안 정 성				
· 펌프 개폐 횟수	40회	29	42	39
· 펌프의 최소 부하율(%)	60.0	70.0	70.0	70.0
· 총 송수량(m ³)	848,299	848,299	848,299	848,299
3. 경 제 성				
· 전력량(KWH)	142,644	141,748	137,081	137,763
· 전력비(1000원)	4,668.4	4,629.6	4,552.6	4,444.5
· 총 공급량(m ³)	846,068	846,068	846,068	846,068

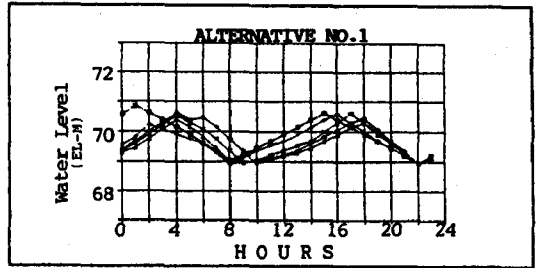
표4 에서 알 수 있듯이 대안 I 은 신뢰성, 안정성 및 제성품 모든 면에서 과거 운영 실적보다 우수하며 특히 펌프의 안정성은 38 % 나 우수하다. 대안 II 는 신뢰성이나 안정성은 과거 실적과 거의 비슷하나 경제성 면에서 약간 유리하며, 대안 III 은 최저 저류량을 2500 m³로 낮게 유지 할 경우로서 안정성 면에서는 과거 실적과 동일하지만 가장 중요한 요소인 경제성에서는 5 % 정도의 전력비를 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

그림3 은 과거의 실적과 각 대안들의 저수지 수위를 시계열 별로 나타낸것으로 기간 중의 저수지 수위가 1일중의 시간별로 나타나있다. 이 그림중 각 대안들에서 알 수 있듯이 전력 에너지 단가가 변경되는 06시 와 18시 직전에 저수지 수위를 가장 높게 유지 하여야 하는 것이 뚜렷하게 나타났으며, 가장 낮을때의 수위에 비해서 2 m정도 높게 유지하여야 한다. 그러나 과거실적을 보면 이러한 점을 고려하여 펌프 및 저수지에 대한 운영을 개선할 수 있는 여지가 보인다. 이렇게 함으로써 1일 중 시간별 저수지 수위나 펌프 가동등의 Guide-line인 Rule Curve를 개발할 수 있다.

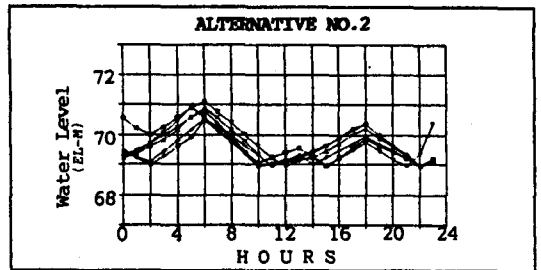
본 계산을 위한 다목적 최적화 프로그램은 IBM 호환용 개인 컴퓨터에 알맞도록 개발되었으며, 1일 24시간 분석을 위한 컴퓨터의 계산 소요시간은 상태 변수인 저수지 저류량의 이산값을 상당히 낮은 수준인 250 m³로 하였을 경우 IBM/AT 호환용 계산기로 3분 05초 소요되었다.



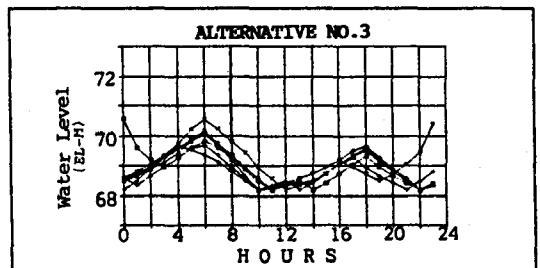
(운영실적 저수지수위곡선)



(대안 I 저수지수위곡선)



(대안 II 저수지수위곡선)



(대안 III 저수지수위곡선)

그림3. 운영실적과 각 대안별 계산결과 비교

5. 결론

본 연구는 상수도 시스템 중 송수 단계의 구성 요소인 펌프와 배수지의 연계 운영에 있어 다목적 분석 기법을 도입하여 최적 운영할 수 있는 방안을 제시하였다. 상수도 송수 시스템의 운영에 따른 기본 목표는 펌프의 가동율이나 가동대수의 조절과 배수지의 운전 수위 조정으로 수요 변동에 대처하여야 하며, 시스템 운전에 필요한 에너지 비용을 절감하면서 펌프 운전에 따른 시스템 안정성의 증대와 추계학적 요소인 용수 수요나 펌프고장 및 정전등에 대처할 수 있도록 배수지의 저류량 확보에 따른 신뢰성의 증대이다.

송수 시스템은 이렇게 여러 목적을 동시에 고려하여야 하는 다목적 최적화 문제로써 ϵ -계약과 Weighting 기법의 혼합 기법을 적용할 수 있는 방안을 제시하였다. ϵ -계약의 최소값과 Weighting 기법의 각 목적에 대한 가중치를 변화시키면서 단일 목적 함수로 변환된 최적화 문제는 동적 계획 기법을 반복적으로 적용함으로써 Nondominated 解群을 발생시킬 수 있었으며, 발생된 解群으로부터 각 목적간 상호 배분 관계를 직접적으로 나타내는 Tradeoff 관계를 제시할 수 있었다. 이 관계도로부터는 최상의 해를 선택할 수 있으며 선택된 해를 시스템의 운영율로 삼을 수 있다. 더욱이 선택된 대안에 대한 최적 운영 결과를 時系列 분석함으로써 일일 중 시간별로 유지하여야 할 저수지 수위라든가 펌프의 가동율 및 가동대수등의 Rule Curve를 개발하여 운영 기준으로 사용할 수 있다.

REFERENCES

- Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.
- Cohon, J. L. and D. H. Marks, "A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques", Water Resources Research, Vol. 11, No.2, pp. 208-220, April 1975.
- Fallside and Perry, Proceedings IEE 122, No. 2, p.202-208, 1975.
- Gojcochea, A., D. R. Hansen, and L. Duckstein, Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Application, John Wiley & Sons, New York, NY, 1982.
- Haines, Y. Y., D. A. Wismer, and L. S. Larsdon, "On Bicriterion Formulation of Integrated System Identification and System Optimization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-1, pp.296-297, July 1971.
- Zadeh, L. A. , "Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria", IEEE Transactions on Automatic Control, AC-8, No.1, pp.59-60, 1963.
- 清水泰治, "上水道 送水系の最適運用法", 東芝レビュー, Vol. 31, No.1, pp.12-15, 昭 51.
- 小館英實, "上水道 送水系の最適運用の一方", 水道協會雜誌, Vol. 510, pp.2-11, 昭52-3.
- 大里有生 外4人, "輸送遅れをもつ上水道系の階層的最適化", 電氣學會誌, 54-C-13, pp.103-110, 昭54-5.