



Optimization of water intake scheduling based on linear programming

Jeong, Gimoon^a · Lee, Indoe^b · Kang, Doosun^{c*}

^aPh.D Student, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^bUndergraduate Student, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^cProfessor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

Paper number: 19-054

Received: 24 July 2019; Revised: 20 August 2019; Accepted: 20 August 2019

Abstract

An optimization model of water intake planning is developed based on a linear programming (LP) for the intelligent water purification plant operation system. The proposed optimization model minimizes the water treatment costs of raw water purification by considering a time-delay of treatment process and hourly electricity tariff, which is subject to various operation constraints, such as water intake limit, storage tank capacity, and water demand forecasts. For demonstration, the developed model is applied to H water purification center. Here, we have tested three optimization strategies and the results are compared and analyzed in economic and safety aspects. The optimization model is expected to be used as a decision support tool for optimal water intake scheduling of domestic water purification centers.

Keywords: Linear programming, Optimization, Water purification plant, Water intake planning

선형계획법을 이용한 정수장 취수계획 최적화

정기문^a · 이인도^b · 강두선^{c*}

^a경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정, ^b경희대학교 사회기반시스템공학과 학사과정, ^c경희대학교 사회기반시스템공학과 교수

요 지

본 연구에서는 지능형 정수장 운영시스템 개발 연구의 일환으로 선형계획법(Linear Programming, LP)을 이용한 정수장 취수계획 최적화 모형을 개발하였다. 개발된 최적화 모형은 원수의 정수처리비용의 최소화를 목적함수로 설정하였으며, 취수 후 정수처리에 소요되는 지연시간과 시간별 전력단가를 고려하여 취수가능량, 예측수요량, 정수지 운영수위 등의 제약조건을 만족하는 최적 취수계획을 제시하였다. 국내 H 정수장을 대상으로 경제적이고 안정적인 정수장 운영을 위해 세 가지 최적화 전략을 적용하고, 그 결과를 경제성과 안정성 측면에서 비교, 분석하였다. 개발 모형은 국내 정수장의 보다 효율적인 취수계획 수립을 위한 의사결정 지원시스템의 형태로 실무에서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어: 선형계획법, 정수장, 취수계획, 최적화

1. 서 론

정수장은 취수원으로부터 용수를 확보하고, 상수도 수질 기준을 만족하여 원수를 처리 및 공급하기 위한 시설로서, 원할하면서도 안전한 상수도 공급의 출발을 담당하는 중요한

역할을 수행한다. 초기의 정수장 제어 및 운영시스템은 일련의 정수처리 공정을 통제하기 위한 단순 관리자의 역할을 담당하였으나, 정수처리 공정의 경제적 효율성 및 공급 안전성을 고려하여 점차 복잡한 기능을 담당하고, 관리자의 부담을 덜어주기 위한 자동화 역량이 점차 강화되어 왔다.

정수장 시설의 운영은 크게 용수 수요를 만족하기 위한 양적(quantitative) 물 관리 측면과 깨끗한 용수를 공급하기 위한 질적(water quality) 물 관리 측면으로 구분할 수 있다. 과거

*Corresponding Author. Tel: +82-31-201-2513
E-mail: doosunkang@khu.ac.kr (D. Kang)

정수장 운영의 최적화 연구는 이러한 정수처리 공정의 효율을 개선하기 위한 수질 관리 위주로 진행되어 왔다. 이후 점차 수요 변동이 증가하고, 1인 가정 등의 사회적 현상으로 인해 수요 패턴이 다양화되면서 원수의 취수계획 수립, 수요량 예측을 통한 송수계획 수립 등 양적 물 관리 또한 중요하게 되었다. 특히, 최근 들어 지속가능한 물 관리와 효율적 용수 공급 문제가 주목받으며, 취수 및 정수 단계에서 이미 용수 공급의 전 과정을 고려하고, 다양한 상수도 공급 사고에 대응하기 위한 지능형 정수장 관리시스템을 도입하고 있다. 따라서 지능형 정수장 운영을 위해서는 취수량의 정확한 계획부터 용수 수요의 정확한 예측, 정수장 규모를 고려한 안정적 운영, 정수장 설비의 경제적인 가동 등이 이루어져야 한다.

용수 수요 예측을 위해 수행된 최근 연구사례를 살펴보면 다음과 같다. Yoo (2014)의 연구에서는 복합 회귀모형을 활용한 단기 물 수요 예측 기법을 개발하였으며, Ahn and Kim (2016)의 연구에서는 데이터마이닝 기법을 활용하여 상수도 이용현황을 바탕으로 한 단기 물 수요 예측 방법을 개발하고, 기존 기법들과 비교하였다. 또한, Hong (2016)의 연구에서는 최근 주목을 받고 있는 빅데이터 기반 모형을 이용하여 다양한 데이터 분석 기법에 따른 수처리 시설의 물 수요를 예측하고, 각 예측 모델의 성능 평가를 실시하였다. 한편, Lee and Park (2011)의 연구에서는 용수공급의 안정성 변화를 판단하기 위해, 기후변화 등 다양한 요인으로 인해 발생하는 물 수요 변화가 취수량에 미치는 영향의 불확실성을 분석한 바 있다.

한편, 정수장 설비 규모를 고려한 안정적이고 경제적인 운영계획 마련은 대부분 최적화 기법을 이용한 연구가 주로 이루어져 왔다. 대표적으로 Han *et al.* (2013), Zhao and Zhao (2014), 그리고 Heydari *et al.* (2015)의 연구에서는 선형계획법을 바탕으로 상수도 수요 예측을 고려한 상수원에서 최적 취수량 결정 모형을 제안한 바 있으며, Lee and Lee (2015)의 연구에서는 취수된 원수가 정수지에 도달하기까지, 정수처리에 소요되는 지연시간과 시간에 따른 전력단가 변화 등을 함께 고려함으로써, 정수장 운영에 적합한 최적 취수량 및 취수계

획 결정 모형을 개발하였다. 이처럼 용수공급시스템에서 시간별 전력단가를 고려한 설비 운영 최적화는 정수장뿐만 아니라 다양한 설비에서 활용될 수 있다. Kang and Lansey (2009)와 Jung *et al.* (2015)의 연구에서는 용수 수요 패턴을 고려한 송수펌프, 제수밸브 등의 실시간 운영 최적화 모형을 제안한 바 있으며, Kim *et al.* (2017)의 연구에서는 시설물 용량을 최적화 결정변수로 포함하여, 초기설계와 실시간 운영을 모두 고려할 수 있는 최적 시설물 계획 모형을 제시하였다.

본 연구에서는 앞서 소개한 Lee and Lee (2015)의 최적 취수량 결정 모형을 참고하였으며, 해당 연구를 개선하고자 하였다. 매시간 정수장 내 정수지의 수위 관측값을 수집하고, 향후 수요량을 예측한 후 해당 데이터를 기반으로 최적 취수계획을 수립하는 실시간 취수계획 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 Lee and Lee (2015)의 연구에서 적용하였던 국내 H 정수장의 데이터를 기반으로 모형을 구축하였으며, 기존 최적화 방법과 금회 제안된 실시간 최적화 방법의 차이를 수요 예측의 불확실성에 따른 취수계획의 안정성과 경제성 측면에서 비교, 분석하였다.

2. 정수장의 취수계획 최적화

2.1 정수지 용량을 고려한 정수장 운영

정수장에서는 상수도 수질 기준을 만족시키기 위한 다양한 정수처리가 요구되며, 이러한 정수장의 운영 절차는 일반적으로 1) 상수원과 정수시설 사이에서 이루어지는 원수의 취수 및 도수, 2) 상수도 수질 기준을 만족시키기 위한 정수처리, 3) 정수된 용수의 배수지 송수 및 저장, 4) 배수지로부터 사용자 용수 공급을 위한 배수 및 급수의 과정으로 구분할 수 있다 (Fig. 1 참조). 이때, 정수장의 안정적인 운영을 위해서는 용수의 예측 수요와 정수지의 운영 수위, 취수 및 정수시설의 규모 등을 고려하여 적절한 취수량을 결정할 필요가 있다.

원수의 정수처리 과정은 타 과정에 비해 긴 시간이 소요되

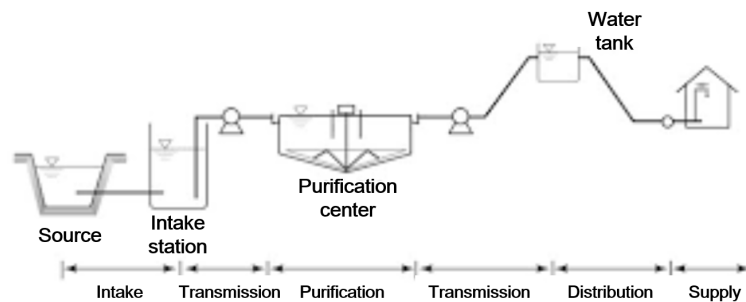


Fig. 1. Overview of water supply and distribution process

며, 따라서 수요량의 변동에 실시간으로 대응할 수 없는 어려움이 존재한다. 정수장의 운영 관리자는 정수처리에 소요되는 시간을 감안해 취수계획을 수립해야 하며, 이때 수요량 변동 및 정수지 보유수량에 따른 수위 변동을 함께 고려하여야 한다. Lee and Lee (2015)의 연구에서는 이러한 자연시간에 따른 정수지의 수량 및 용수 수요량, 취수량의 관계를 아래의 Eq. (1)과 같이 표현한 바 있다.

$$W_{i+1} = W_i + P_{i-T} - D_i \quad (1)$$

여기서, W_i : 현재 시점의 정수지 보유수량(m^3), W_{i+1} : 다음 시점의 정수지 보유수량(m^3), T : 정수처리를 위한 소요시간(hr), P_{i-T} : 현재로부터 T시간 이전의 단위시간 취수량(즉, 현재 시점에 정수처리 후 정수지로 유입되는 용수의 양, m^3), D_i : 현재 시점의 단위시간 용수 수요량(m^3)

Eq. (1)에서는 현재 시점의 정수지 보유수량(W_i)에 초점을 맞추어 다음 시간의 정수지 보유수량(W_{i+1})에 영향을 미치는 요소를 고려한 정수지 수량 및 수위 예측 모형으로 판단할 수 있다. 이 때, 다음 시간의 정수지 보유수량은 현재 시점의 정수지 수위로부터 자연시간(T) 이전에 이미 결정된 취수량(P_{i-T})을 바탕으로 산정되므로, 취수계획을 수립하기 위한 수식으로 적합하지 않다. 따라서, Eq. (1)을 취수량이 결정되는 시점으로 표현하면 아래의 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{i+T+1} = W_{i+T} + P_i - D_{i+T} \quad (2)$$

Eq. (2)를 통해, 정수장에서 현재 시점의 취수량(P_i)을 결정하기 위해서는 자연시간 이후의 정수지 보유수량(W_{i+T}) 및 수요량 예측(D_{i+T})이 필요함을 파악할 수 있다. 이 때, 정수장을 포함한 상수도 시스템의 운영은 해당 공급지역에서의 용수 수요예측 결과를 바탕으로 이루어지므로, 현재 시점의 정수지 보유수량 및 예측수요량을 통해 취수량 결정에 필요한 정보를 확보할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 과정이 보다 직관적으로 한번에 이루어질 수 있도록, Eq. (2)를 아래의 Eq. (3)과 같이 변형하여 취수량(P_i) 결정 시 동일 시점의 정수지 보유수량(W_i)을 활용할 수 있도록 수식을 개선하였다.

$$W_{i+T+1} = W_i + \sum_{k=1}^T (P_{i-k} - D_{i+T-k}) + P_i - D_{i+T} \quad (3)$$

즉, Eq. (3)에서는 예측 모형의 시점을 취수량 기준으로 변경하였으며, 현재 정수지 보유수량, 과거 취수량 정보와 장래

수요예측값을 함께 포함하고 있으므로, 정수장에서의 취수 계획 수립 시 보다 손쉽게 활용할 수 있다. 본 연구에서는 Eq. (3)을 이용하여 선형계획모형을 구축하였다.

2.2 선형계획법을 이용한 최적화 모형의 구조

선형계획법은 수학적 최적화 기법의 하나로써, 목적함수(objective function) 및 제약조건(constraints) 등이 모두 선형함수로 구성될 때 적용 가능한 최적화 기법이다. 선형계획법은 비교적 제한적인 문제에서만 적용할 수 있는 단점이 있는 반면, 선형관계 사이에서 등호 제약조건(equality constraints) 및 부등호 제약조건(inequality constraints)에 의해 정의된 가능한 솔루션들(feasible solutions) 중에서 목적함수를 가장 잘 만족시키는 전역 최적 솔루션(global optimal solution)을 수학적 과정으로 손쉽게 찾아낼 수 있는 장점이 있다. 시스템 관련 최적화 문제에서는 주로 시스템의 운영 효율을 극대화시키기 위해, 비용의 최소화 및 편익의 최대화, 또는 목표 성능의 최대화 등을 목적함수로 활용하고 있으며, 본 연구에서는 정수시설 운영 상 소요되는 전력 소비에 따른 비용 최소화 문제를 적용하였다.

정수장의 운영 과정에서는 시설 운영에 따른 전력 소비가 발생하며, 이 때 사용시간에 따른 전력단가의 변화는 관련 설비의 효율적인 운영 계획 수립에 큰 영향을 미친다. 정수장을 포함한 다양한 용수공급시설의 운영에서는 이러한 전력단가의 변화를 고려하여, 전력단가가 낮은 시간대에 시설 가동을 늘려 용수량을 미리 확보하는 등의 운영 전략을 채택하고 있다. 즉, 경제적인 시설 운영을 위해서는 전력단가가 높은 시간대의 설비가동을 지양하고, 해당 시간 동안의 공급 부진을 만회하기 위해 전력단가가 낮은 시간대에 중점적으로 설비를 가동하는 것이 효율적이다. 특히 정수처리 설비를 포함하여 전력 소비가 큰 정수장의 경우 이러한 전력단가의 변화는 정수지 기준 수위의 유지와 함께 취수계획 수립 시 가장 중요하게 고려해야 할 요소이다.

Lee and Lee (2015)의 연구에서는 Eq. (1)을 바탕으로 선형계획법을 활용하여 가장 낮은 비용으로 정수장을 운영하기 위한 24시간 단위 취수량 결정 최적화 방안을 제안한 바 있다. 즉, Eq. (4)와 같은 목적함수를 통해 24시간의 수요 패턴과 시간당 전력단가를 함께 고려하여 매 시간당 취수량을 미리 계획함으로써 가장 경제적인 취수계획을 수립하였다. 또한, 취수 가능한 설비 규모 및 정수지 보유수량 등을 Eqs. (5) and (6)과 같이 제약조건으로 고려함으로써, 수요 변동에도 정수지의 보유수량이 운영 기준(하한 및 상한 보유수량)을 벗어나지 않도록 취수계획의 안정성을 고려하였다.

$$Minimize : Cost = \sum_{i=0}^{23} P_i \cdot R \cdot AC_i \quad (4)$$

여기서, P_i : i 시점의 단위시간 취수량(m^3), R : 정수설비 에너지 효율(KWh/ m^3), AC_i : i 시점의 전력단가(Won/KWh).

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \quad (5)$$

$$W_{min} \leq W_i \leq W_{max} \quad (6)$$

여기서, P_{min} : 단위시간 취수가능량의 하한 범위(m^3), P_{max} : 단위시간 취수가능량의 상한 범위(m^3), W_{min} : 정수지 하한 수량(m^3), W_{max} : 정수지 상한 수량(m^3).

본 연구에서는 공학용 프로그래밍 도구인 Matlab (Mathworks, 2019)에서 제공하는 선형계획법 기능을 기반으로 모형을 구축하였으며, 정수장 취수계획 수립 시 활용할 수 있는 다양한 최적화 전략(strategy)을 다음과 같이 제안하였다.

- Strategy 1: 전체 모의기간의 취수계획을 한 번에 수립하는 방안(모의기간 단일 최적화)
- Strategy 2: 24시간의 취수계획을 1일(24시간) 간격으로 수립하는 방안(24시간-24시간 최적화)
- Strategy 3: 24시간의 취수계획을 1시간 간격으로 실시간 수립하는 방안(24시간-실시간 최적화)

각각의 Strategy에 따른 최적화 적용의 차이점은 다음과 같이 정리할 수 있다. 예를 들어, 일주일(168시간)의 최적 취수계획을 수립하고자 하는 경우, 1) Strategy 1은 향후 일주일 동안의 수요예측 결과를 바탕으로 단 한번의 최적모의를 통해 향후 일주일간의 취수계획을 수립한다. Fig. 2(a)를 통해, 168시간 동안의 취수계획에 해당하는 168개의 결정변수가 한 번에 결정되는 Strategy 1의 최적화 구조를 파악할 수 있다. Strategy 1에 의해 도출된 취수계획은 모의기간 내 수요예측을 한꺼번에 고려할 수 있으므로 가장 경제적인 취수계획을 제시할 수 있는 반면, 수요예측 시점이 멀어짐에 따라 수요예측의 정확도가 감소하는 문제로 인해 실제 정수장 운영에 반영할 경우 정수지 보유수량이 운영기준의 범위를 벗어날 가능성이 높을 것으로 예상할 수 있다.

2) Strategy 2는 Fig. 2(b)와 같이 매일 자정에 향후 24시간의 취수계획을 최적화한 후, 취수계획이 종료되는 다음 날 자정에 다시 다음 24시간의 취수계획을 수립하는 최적화 구조로 이루어져 있다. 따라서 Strategy 2 모형은 취수계획 수립 시점에서 향후 24시간의 수요예측만을 고려하므로, 취수계획의 경제성은 Strategy 1에 미치지 못하지만, 24시간마다 수요예측의 불확실성으로 인한 정수지 보유수량 오차를 모의과

정에서 반영할 수 있으므로 정수지 운영의 안정성은 개선될 것임을 예상할 수 있다.

마지막으로, 3) Strategy 3은 Fig. 2(c)와 같이 1시간 간격으로 다음 24시간의 취수계획을 수립한다. 이 때, 매시간 24시간의 취수계획을 수립하지만, 1시간 경과 후 나머지 23시간의 취수계획을 포함한 24시간의 취수계획을 실시간 다시 수립함으로써 앞서 결정된 취수계획을 보정하는 구조로 이루어져 있다. 따라서 Strategy 3은 실시간으로 변동되는 정수지 수위를 반영하여 취수계획을 업데이트함으로써 경제성과 아울러 정수지 운영의 안정성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. Table 1에서는 1주일 모의를 기준으로 각 Strategy 별 최적화 수행에 필요한 변수들의 크기를 정리하였다.

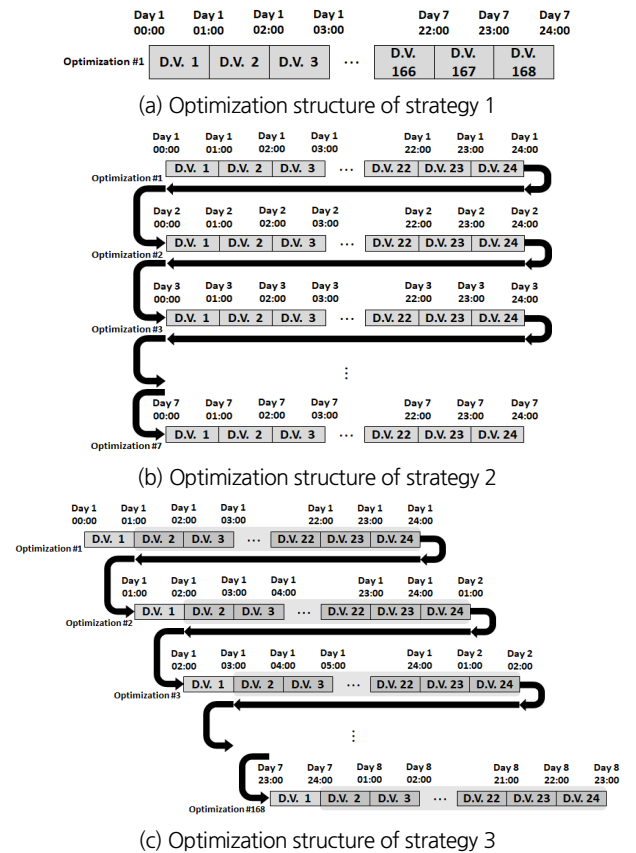


Fig. 2. Optimization structure of the proposed strategies

Table 1. Optimization statistics of the proposed strategies for one week simulation

Variables	Strategy 1	Strategy 2	Strategy 3
Number of decision variables per single optimization run	168	24	24
Number of total optimization run	1	7	168
Optimization time step (hr)	1	1	1

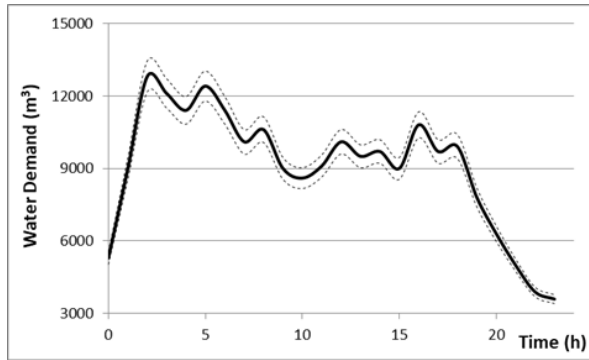


Fig. 3. Base demand and temporal variation range

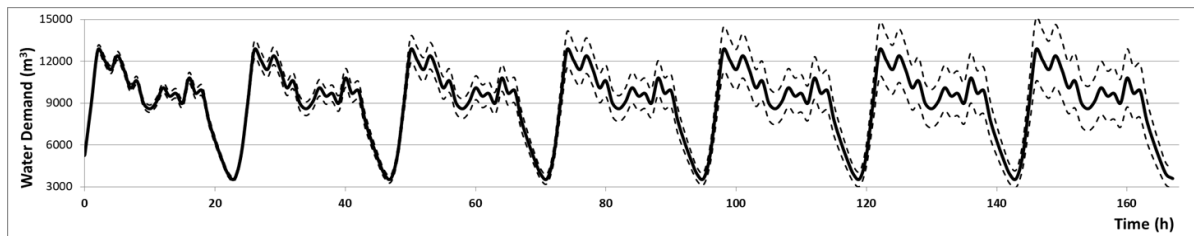


Fig. 4. Temporal water demand forecasting range for one week simulation

2.3 용수 수요예측의 불확실성

앞서 언급한 바와 같이, 각각의 취수계획 최적화 전략은 수요예측의 범위와 불확실성이 상이하므로 서로 다른 정수지 운영 안정성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 Strategy 별 정수지 운영의 안정성을 정량적으로 비교, 분석하기 위해 용수 수요예측의 불확실성을 다음과 같이 모의하였다. 먼저, 해당 용수공급 지역의 기준 용수사용량에 시간별 수요 변동성을 반영한 실제 수요량을 작성하였고, 작성된 실제 수요량에 예측 오차를 반영한 수요 예측값을 발생하였다. 여기서 실제 수요량의 경우 Fig. 3과 같이 기준 수요량으로부터 $\pm 5\%$ 의 변동값을 추가하여 발생하였으며, 예측 수요량은 실제 수요량을 기준으로 Fig. 4와 같이 최소 $\pm 2\%$ 부터 최대 $\pm 20\%$ 까지 시간에 따른 수요예측 불확실성을 적용하였다. 이 때, 수요예측의 불확실성은 취수계획의 수립 시점으로부터 1시간 직후의 수요예측이 $\pm 2\%$ 의 범위로 가장 낮으며, 일주일 이후의 수요예측이 $\pm 20\%$ 의 범위로 가장 오차가 크게 발생하도록 하였으며, 시간이 경과함에 따라 오차 범위가 선형적으로 증가하는 것으로 가정하였다. 즉, Strategy 1의 경우 수요예측의 불확실성은 $\pm 2\%$ (1시간 후)부터 $\pm 20\%$ (168시간 후)까지의 범위를 가지며, Strategy 2와 Strategy 3의 경우 $\pm 2\%$ (1시간 후)부터 $\pm 4.5\%$ (24시간 후)까지의 불확실성만을 갖는 것으로 이해할 수 있다.

3. 적용결과 및 분석

3.1 적용시설 개요

앞서 Lee and Lee (2015)의 연구에서 적용한 바 있는 국내 H 정수장을 test-bed로 선정하였으며, 해당 시설물의 시간별 전력단가는 Table 2와 같이 적용되는 것으로 조사되었다. 또한, 해당 정수장에서의 정수처리 소요시간(T)은 평균 6시간으로 나타났으며, 따라서 현재 시간에 정수장으로 집수된 원수는 6시간 동안 정수처리를 거쳐 정수지로 유입되는 것으로

Table 2. Energy tariff by season and daily time (KEPCO, 2015)

Time zone	Electricity unit cost (Won/KWh)		
	Summer (Jun.~Aug.)	Spring/Fall (Mar.~May., Sep.~Oct.)	Winter (Nov.~Feb.)
Low load (23:00 ~ 09:00)	56.1	56.1	63.1
Midium load (09:00 ~ 10:00) (12:00 ~ 13:00) (17:00 ~ 23:00)	109.0	78.6	109.2
High load (10:00 ~ 12:00) (13:00 ~ 17:00)	191.1	109.3	166.7

Table 3. Electricity unit cost for unit intake purification (Lee and Lee, 2015)

Time	AC_i (Won/KWh)	Time	AC_i (Won/KWh)
0	56.10	12	99.07
1	56.10	13	99.07
2	56.10	14	93.95
3	56.10	15	88.83
4	59.85	16	83.72
5	68.72	17	78.60
6	77.58	18	74.85
7	81.33	19	71.10
8	90.20	20	67.35
9	99.07	21	63.60
10	104.18	22	59.85
11	104.18	23	56.10

파악할 수 있다. 이를 바탕으로 시간대별로 취수된 원수의 정수처리를 위한 평균 전력단가(AC_i)를 산정한 결과는 Table 3과 같다. 즉, Table 2의 전력단가를 토대로 취수시점부터 향후 6시간 동안의 정수처리를 위한 전력단가를 평균하여 산정하였다. 여기서 흥미로운 사실은 정수처리 시간을 고려한 평균 전력단가(Table 3)는 시간별 전력단가(Table 2)와 다르게 자정(00시)으로부터 오전 11시에 이르기까지 점진적으로 증가하다가 정오(12시)부터 자정까지 다시 점진적으로 감소하는 경향을 보인다는 점이다.

H 정수장의 정수처리 시설 규모는 다음과 같이 조사되었다. 먼저, 취수가능한 원수의 양은 취수펌프 및 정수장 용량에 따라 시간당 최소 0 m^3 부터 최대 $15,000\text{ m}^3$ 의 원수를 취수할 수 있는 것으로 나타났으며, 단위용수 1 m^3 를 정수하기 위해 소요되는 단위 전력소비량(R)은 0.07694 KWh/m^3 로 조사되었다. 정수장 내 정수지의 운영 가능한 용량은 $178,365\text{ m}^3$ 이며, 정수지 운영 수위는 $3.1\sim 4.6\text{ m}$ 의 범위 내에서 운영된다. 여기서 실제 H 정수장의 정수지는 다양한 규모의 정수지를 다수 운영하는 방식으로 구성되어 있으나, 모든 정수지의 형태 및 운영 수위가 동일함에 따라, 전체 운영 용량을 기준으로 Fig. 5와 같이 원통형의 단일 정수지로 가정하여 적용하였다.

따라서, 본 적용 연구에서는 앞서 산정한 시간별 평균 정수처리 전력단가(AC_i), 정수처리 단위 전력소비량(R), 취수가능량 범위(P_{min}, P_{max}), 정수지 운영 수위(보유수량) 기준(W_{min}, W_{max}) 등을 고려하여 취수계획 최적화 모형의 목적함수 및 제약조건을 구성하였다.

마지막으로, 용수 수요예측을 위한 H 정수장의 시간별 기준 용수 수요량은 Table 4와 같이 조사되었다. 본 연구에서는

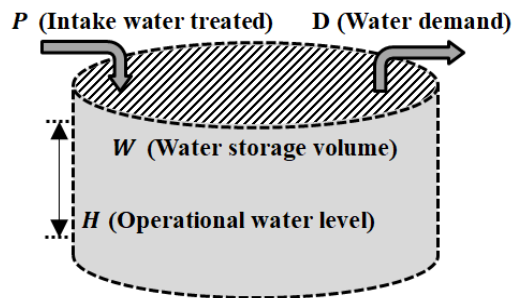


Fig. 5. Conceptual dimension of clean water reservoir

Table 4. Hourly water demand of H purification plant (Base value)

Time	Water demand (m^3)	Time	Water demand (m^3)	Time	Water demand (m^3)
0	9,900	8	12,800	16	8,600
1	7,800	9	12,100	17	9,100
2	6,300	10	11,400	18	10,100
3	5,000	11	12,400	19	9,500
4	3,900	12	11,400	20	9,700
5	3,600	13	10,100	21	9,000
6	5,300	14	10,600	22	10,800
7	9,000	15	9,000	23	9,700

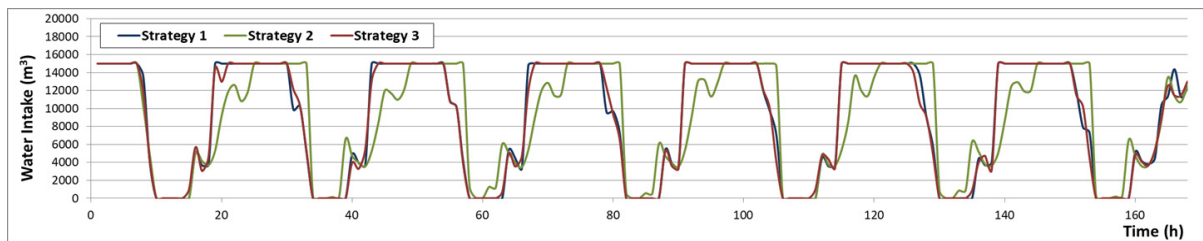
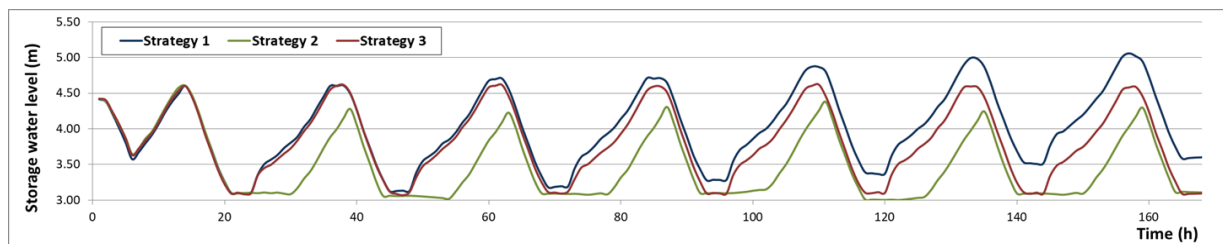
앞서 언급한 바와 같이, Table 4의 기준 수요량에 $\pm 5\%$ 범위의 변동값을 추가하여 실제 수요량을 발생하였고, 산정된 실제 수요량에 최소 $\pm 2\%$ 에서 최대 $\pm 20\%$ 의 오차를 가정하여 수요 예측값을 산정한 후 모형에 적용하였다.

3.2 최적화 Strategy별 결과 비교분석

제안된 세 가지 최적화 Strategy별 취수계획 최적화 결과를 비교 분석하기 위해, 수요예측값의 불확실성을 고려하여 총 1,000회의 MCS (Monte-Carlo Simulation)를 수행하였다. 이 때, 취수계획의 수립은 예측 수요량을 기준으로 각각의 최적화 모형을 적용하여 이루어진다. 계획된 취수량은 정수처리를 거쳐 6시간 후 정수지로 유입되며, 해당 시간에 정수지에서 공급되는 수요량은 예측 수요량이 아닌 실제 수요량을 적용함으로써 정수지의 실제 보유수량과 수위를 산정하였다. 이와 같이 도출된 MCS 결과를 바탕으로 평균값과 최소, 최대값을 산정하여 1) 취수계획의 경제성 측면, 2) 정수지 운영의 안정성 측면에서 각각 비교, 분석하였다. 비교분석에 앞서 Strategy별 주요 적용 결과는 아래의 Table 5와 같이 요약할 수 있으며, 임의의 대표 MCS에 대하여 시간별 취수량상 및 정수지 수위 변화양상을 나타낸 결과는 Figs. 6 and 7을 통해 확인할 수 있다.

Table 5. Comparative analysis results of the proposed optimization strategies

Application results	Strategy 1	Strategy 2	Strategy 3
Operation cost (Won/week) (MCS average)	98,467,507	101,492,038	98,482,974
Lower storage water level violation (hr/year) (MCS average)	787	1,778	652
Upper storage water level violation (hr/year) (MCS average)	548	26	365
Total storage water level violation (hr/year) (MCS average)	1,335	1,804	1,017
Lowest storage water level (m) (MCS min)	2.20 (-0.90)	2.96 (-0.14)	3.01 (-0.09)
Highest storage water level (m) (MCS max)	5.25 (+0.65)	4.68 (+0.08)	4.67 (+0.07)
Optimization running time (sec) (MCS average)	0.02	0.07	1.08

**Fig. 6.** Comparison of water intake patterns of the proposed optimization strategies**Fig. 7.** Comparison of storage water level changes of the proposed optimization strategies

3.2.1 최적화 Strategy별 경제성 비교분석

최적화 Strategy별 취수계획의 경제성을 비교, 분석한 결과는 다음과 같다. Strategy 1의 경우 일주일 정수 처리비용은 MCS 평균 약 98,467,507원으로 나타났으며, Strategy 2의 경우 Strategy 1 대비 약 3.1% 증가한 101,492,038원, Strategy 3의 경우 Strategy 1과 매우 근접한 수준인 98,482,974원(13,467 원 증가)으로 나타났다. 즉, Strategy 1과 Strategy 3의 경제성은 동일한 수준인 것으로 판단할 수 있으며, 24시간 취수계획을 24시간 단위로 최적화하였던 Strategy 2의 경제성이 가장 떨어지는 것으로 분석하였다.

Strategy 1의 경우, 전체 모의기간(일주일)의 수요예측값을 토대로 취수계획을 수립하므로, 전력단가가 상대적으로 낮은 시간대에 취수와 정수처리를 수행하는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 가장 경제적인 모의결과를 나타내고 있다.

Strategy 2의 경우, 현재 취수계획 수립 시점에서 다음 취수계획 수립까지 24시간의 시간 간격이 존재하며, 현재 시점에

서의 취수계획은 24시간 이후의 수요패턴은 고려할 수 없다. 따라서, 최적화 모의가 종료되는 시점(24시)에 정수지의 수위를 최대한 하한 수위에 가깝도록 취수를 제한하는 것을 경제적인 취수계획으로 판단한다(Fig. 7의 정수지 수위 참조). 이러한 경우, 실제로 24시간이 지난 후 예상과 달리 갑작스럽게 용수수요가 증가하는 경우에 전력 단가가 높은 시간대에 취수와 정수처리가 불가피하게 발생하여 처리비용이 증가하는 것으로 분석되었다.

Strategy 3의 경우, Strategy 2와 마찬가지로 24시간 수요예측값을 사용하지만, 매 시간 새로운 수요예측과 취수계획을 수립함으로써 실제 수요량의 변동에 보다 유연하게 대처하는 것으로 분석되었다.

3.2.2 최적화 Strategy별 안정성 비교분석

다음으로, 최적화 Strategy별 정수지 운영의 안정성을 비교, 분석한 결과는 다음과 같다. Strategy 1 적용 결과, 정수지

운영 수위는 1년 주기로 환산할 경우, 연간 약 1,335시간(MCS 평균) 제약 수위를 벗어나는 것으로 나타났으며, 하한 수위 미달이 787시간, 상한 수위 초과가 548시간으로 나타나 하한 수위 미달 현상이 자주 발생하는 것으로 나타났다. 하한 수위에 도달하지 못한 MCS 내 최저 수위는 하한 수위보다 0.9 m 낮은 2.20 m로 나타났으며, 상한 수위를 초과한 MCS 내 최고 수위는 상한 수위보다 0.65 m 높은 5.25 m로 나타났다. Strategy 1의 경우, 일주일 동안의 수요예측값을 토대로 취수계획을 수립하므로, 예측 수요량의 불확실성이 가장 크다. 따라서 예측 수요와 실제수요가 크게 다른 경우 정수지의 제한 수위를 벗어나는 경우가 빈번하며, 미달 혹은 초과되는 수위가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 세 가지 Strategy 중 정수지 운영수위의 안정성은 가장 낮은 것으로 분석되었다.

Strategy 2 적용 결과, 정수지 운영 수위는 연간 약 1,804시간(MCS 평균) 제약 수위를 벗어났으며, 하한수위 미달이 1,778시간, 상한수위 초과가 26시간으로 하한수위 위반 상황이 높은 비율로 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 앞서 경제성 분석에서 언급한 바와 같이 Strategy 2에서는 모의 종료시간에 맞춰 정수지 수위가 최대한 하한수위에 근접하도록 취수계획을 수립하기 때문에, 다음날 용수수요가 증가할 경우 미처 대처하지 못하고 정수지 수위가 하한수위보다 낮아지는 경우가 자주 발생하는 것으로 분석되었다. 반대로 Fig. 7의 예시에 나타난 바와 같이 정수지의 상한 수위(4.6 m)를 충분히 활용하지 못하고 있으므로, 상한 수위에 도달하는 빈도가 다른 Strategy에 비해 적어, 상대적으로 상한 수위 위반 횟수가 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 MCS 내 최저 수위는 하한수위보다 0.14 m 낮은 2.96 m, 최고 수위는 상한수위보다 0.08 m 높은 4.68 m인 것으로 나타나 Strategy 1 대비 개선된 결과를 보였다. 즉, 세 가지 Strategy 중 정수지 운영수위를 벗어난 경우는 가장 빈번히 발생하지만 침범한 수위는 크지 않은 것으로 분석되었다.

Strategy 3의 경우, 정수지 운영수위는 연간 약 1,017시간(MCS 평균) 제약 수위를 벗어났으며, 하한수위 미달이 652회, 상한수위 초과가 365회로 나타나 하한수위 미달이 주로 발생하는 양상을 보였다. MCS 내 최저 수위는 하한수위보다 0.09 m 낮은 3.01 m, 최고 수위는 상한수위보다 0.07 m 높은 4.67 m를 보임으로써, 제한 수위 위반 횟수 및 위반 수위 모두 전체 Strategy 중 가장 안정적인 결과를 보였다. 이러한 결과는 Strategy 3에서 실시간 수요예측과 더불어 매시간 정수지 수위 예측값을 모형에 반영하여 보정하기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

한편, 일주일 최적 취수계획 수립에 소요된 계산시간은 동일한 조건에서 Strategy 1, 2, 3 순서로 각각 0.02초, 0.07초, 1.08초로 나타났으며, 실무에서 모두 적용 가능한 수준인 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 선형계획법을 기반으로 정수장의 취수계획 최적화 모형을 개발하였다. 경제적이고 안정적인 정수장 운영을 위해 세 가지 최적화 전략을 수립하고 그 결과를 경제성과 안정성 측면에서 비교, 분석하였다. 적용된 세 가지 최적화 Strategy는 다음과 같다. Strategy 1은 전체 모의기간의 취수계획을 한 번에 수립하는 장기 최적화 방안, Strategy 2는 24시간의 취수계획을 1일 간격으로 수립하는 일단위 최적화 방안(Lee and Lee, 2015), 그리고 Strategy 3는 24시간의 취수계획을 1시간 간격으로 수립하는 실시간 최적화 방안이다. 본 연구에서는 수요예측값의 불확실성을 고려하여 각각 1,000회의 MCS를 수행한 후, 최적화 Strategy별 취수계획의 경제성과 안정성을 비교, 분석하였다.

국내 H 정수장을 대상으로 개발 모형을 적용한 결과, 본 연구에서 제안한 Strategy 1과 Strategy 3 최적화 모형은 유사한 수준의 경제성을 보였으며, 기존 Strategy 2 모형에서 가장 높은 비용이 발생하는 것으로 나타났다. 안정성 측면에서는 Strategy 1의 수요예측값의 불확실성이 가장 크게 나타나 정수지 운영 수위를 크게 벗어나는 문제가 발생하였다. Strategy 2의 경우, 운영 수위를 벗어나는 빈도가 가장 높게 나타났으며, 특히 하한 수위를 벗어나는 빈도가 두드러지게 발생하였다. Strategy 3의 경우 실시간으로 정수지 수위관측값과 수요예측값을 보정하므로, 정수지 운영 수위를 탄력적으로 활용하여 가장 안정적인 정수지 운영을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 제시된 세 가지 방안 중 Strategy 3이 경제성과 안정성 측면에서 가장 효과적인 취수계획을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 최적화 모형을 활용한다면 국내 정수장에서 보다 효율적인 취수계획 수립이 가능할 것으로 판단되며, 향후 수요예측값의 정확도 향상과 비상상황 대응 시나리오 등의 다양성을 모형에 추가함으로써, 실제 정수장 설비 운영 및 시설보강 계획 수립 시 스마트 의사결정 시스템으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 1) 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리사업(과제번호 83079)과 2) 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스·교육허브개발사업(NRF-2017MBC1A6075016)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J., and Kim, J. (2016). "The comparison among prediction methods of water demand and analysis of data on water services using data mining techniques." *Korea Bigdata Society*, Vol. 1, No. 1, pp. 9-17.
- Han, Y., Huang, Y., Jia, S., and Liu, J. (2013). "An interval-parameter fuzzy linear programming with stochastic vertices model for water resources management under uncertainty." *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-12.
- Heydari, M., ShahiriParsa, A., Noori, M., Othman, F., and Qaderi, K. (2015). "Introduction to linear programming as a popular tool in optimal reservoir operation, a review." *Advances in Environmental Biology*, Vol. 9, No. 3, pp. 906-917.
- Hong, E. (2016). *Water demand prediction in water treatment plant using data analysis*. Masters dissertation, Hallym University, Chuncheon, Republic of Korea.
- Jung, D., Kang, D., Kang, M., and Kim, B. (2015). "Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 1987-1993.
- Kang, D., and Lansey, K. (2009). "Real-time optimal valve operation and booster disinfection for water quality in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 4, pp. 463-473.
- Kim, K., Choi, J., Jung, D., and Kang, D. (2017). "Sensitivity analysis of pump and tank sizes on water network operation and water age." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 12, pp. 803-813.
- Korea Electric Power Corporation (KEPCO) (2015). *Electricity Rate Table*.
- Lee, C., and Lee, K. (2015). "Determination of optimal hourly water intake amount for H Arisu purification." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 12, pp. 1051-1064.
- Lee, S., and Park, H. (2011). "Understanding uncertainties in projecting water demand and effects of climate change for adaptive management of water supply risk of the water resources system." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 25, No. 3, pp. 293-305.
- Mathworks, C. (2019). *MATLAB and Optimization Toolbox™ Release R2019a*.
- Yoo, S. (2014). *Short-term water demand forecasting scheme using hybrid model*. Masters dissertation, Chungbuk National University, Cheongju, Republic of Korea.
- Zhao, T., and Zhao, J. (2014). "Optimizing operation of water supply reservoir: the role of constraints." *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-15.