

선형계획법을 활용한 정수장의 실시간 최적 취수량 결정

이종호, 이인도, 정기문*

사회기반시스템공학과, 경희대학교, 경기도 용인시

E-mail: gimoon1118@gmail.com*

최근 효율적인 물 관리를 위해 정수장의 취수 및 정수 단계에서 물 공급의 전 과정을 고려할 수 있는 지능형 정수장 관리시스템이 각광받고 있다. 특히, 수질관리 측면에 다소 집중되었던 정수장 운영의 중요도는 수량을 함께 관리하는 방향으로 변화할 것으로 전망된다. 상수도 공급의 출발점이라고 할 수 있는 정수장에서, 양적 물 관리의 핵심은 정수처리로 인한 지연시간을 고려하여 예측 수요량과 배수지의 수위를 만족시키는 동시에 경제적으로 효율 있는 취수계획을 수립하는 것이다. 본 연구에서는 정수장 설비의 운영조건 및 전력단가를 고려하여 정수장의 취수계획을 실시간으로 최적화하기 위한 모형을 개발하였으며, 국내 H 정수장을 대상으로 개발 모형을 검증하고 그 개선효과를 분석하였다.

서론

상수도 수질 기준을 만족하여 원수를 처리 및 공급하기 위한 정수장의 운영은 안전하고 원활한 상수도 공급의 출발을 담당하는 중요한 절차이다. 과거의 정수장 제어시스템은 단순히 일련의 처리 공정을 제어하기 위한 관리자의 역할을 담당하였으나, 최근 들어 효율적인 물 관리와 공급 문제가 주목받고 있으며, 최근에는 취수 및 정수 단계에서 이미 물 공급의 전 과정을 고려하고, 다양한 상수도 공급 사고에 대응하기 위한 지능형 정수장 관리시스템을 도입하고 있다.

정수장 시설의 운영은 크게 용수 수요를 관리하기 위한 양적(Hydraulic) 물 관리 측면과 안전한 상수도 공급을 관리하기 위한 질적(Water quality) 물 관리 측면으로 구분할 수 있다. 과거 정수장 운영의 최적화 연구는 이러한 정수처리 공정의 효율을 개선하기 위한 질적 물 관리 위주로 진행되어 왔다. 그러나 점

차 용수 수요가 증가하고, 1인가정 등의 사회적 현상으로 인해 수요 패턴이 다양화되면서 배수지의 관리, 나아가 원수의 취수 계획 수립 등 양적 물 관리 또한 중요한 연구 주제가 될 것으로 예상된다. 대표적으로 Han et al. (2013), Zhao and Zhao (2014), Heydari et al. (2015) 등의 연구에서는 선형계획법을 바탕으로 상수도 수요 예측을 고려한 상수원에서의 최적 취수량 배분 결정 모형을 제안한 바 있으며, Lee and Lee (2015)의 연구에서는 취수된 원수가 배수지에 도달하기까지, 정수처리에 소요되는 지연시간과 시간에 따른 전력단가 변화 등을 함께 고려함으로써, 정수장 운영에 적합한 최적 취수량 및 취수 계획 결정 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 Lee and Lee (2015)의 최적 취수량 결정 모형을 바탕으로, 정수시설을 운영함에 있어 배수지의 안정적인 수위를 유지함과 동시에 용수 수요를 실시간으로 고려하기 위한 실시간 최적 취수량 결정 모형을 개발하

였다. 개발 모형은 국내 H 정수장의 정수설비 규모, 용수 수요예측 및 전력단가 변화를 바탕으로 적용하여 검증하였으며, 특히 기존 최적화 방법과 제안된 방법의 차이를 다양한 측면에서 비교하였다. 또한, 본 연구에서는 정수장 설비 규모가 변화함에 따라 제안된 실시간 최적화 방법의 개선효과가 어떠한 차이를 보이는지 민감도 분석을 함께 수행하였다.

이론 및 연구 방법

상수도 공급을 위한 정수장의 운영 절차는 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(Figure 1 참조). 이 때, 정수장의 효율적인 운영을 위해서는 용수의 예측 수요와 배수지의 운영 수위, 취수 및 정수시설의 규모 등을 고려하여 적절한 취수량을 결정할 필요가 있다.

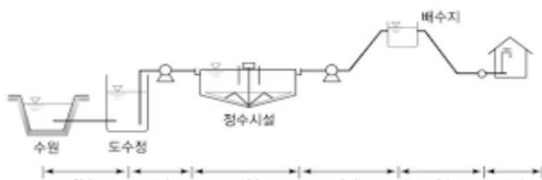


Figure 1. 상수도시스템의 물 공급 절차 모식도

정수시설의 운영 과정에서 원수의 취수와 도수, 정수처리 과정은 타 과정에 비해 다소 긴 시간이 소요되며, 따라서 정수장의 운영 관리자는 이러한 지연시간을 감안해 수요량 및 배수지 수위를 예측하여 취수 계획을 결정해야 한다. Lee and Lee (2015)의 연구에서는 이러한 지연시간에 따른 배수지의 수위 및 용수 수요량, 취수량의 관계를 아래의 식(1)과 같이 표현한 바 있다.

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

여기서, T : 정수처리 과정에 의한 지연시간, W_i : 현재 시점의 배수지 수위, W_{i+1} : 다음 시점의 배수지 수위, P_{i-T} : 지연시간 이전의 취수량 (즉, 현재 시점에 배수지로 유입되는 용수의 양), D_i : 현재 시점의 용수 수요량

그러나 식 (1)은 배수지에 초점을 맞추어 다음 시간의 배수지 수위를 예측하기 위해 활용할 수 있으며, 이는 이미 지연시간 이전에 결정된 취수량을 바탕으로 산정된다. 이를 정수장에 초점을 맞추어 취수량을 결정하는 시점으로 이를 표현하면 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (2)를 통해, 정수장의 취수량 결정은 앞서 언급한 바와 같이 지연시간 이후의 예측 배수지 수위 및 수요량을 바탕으로 결정됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 과정이 보다 직관적으로 이루어질 수 있도록, 아래의 식 (3)과 같이 식 (2)를 변형하여 취수량 결정 시 동일한 시점의 배수지 수위를 활용하는 방안을 제안하였다.

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

식 (3)에서는 식 (2)의 지연시간 이후의 배수지 수위에 지연시간 동안의 공급량 및 수요 예측 정보를 반영하여 이를 현재 배수지 수위로 표현하고 있으며 즉, 식 (2)를 활용하기 위해 지연시간 이후의 배수지 수위를 예측하였던 과정을 함께 내포함으로써 현재의 배수지 수위를 활용하고 있다.

한편, 정수장의 운영 과정에서는 시설 운영에 따른 전력 소비가 이루어지며, 이 때 사용시간에 따른 전력단가의 변화는 관련 설비의

효율적인 운영 계획 수립에 큰 영향을 미친다. 정수장을 포함한 다양한 용수공급시설의 운영에서는 이러한 전력단가의 변화를 고려하여, 가압 펌프를 통해 용수 사용지역 내 고지대의 배수지 수위를 미리 확보하는 등의 운영 전략을 채택하고 있다. 즉, 경제적인 시설 운영을 위해서는 전력단가가 높은 시간대의 설비 가동을 지양하고, 해당 시간 동안의 공급 부진을 보완하기 위해 전력단가가 낮은 시간대에 중점적으로 설비를 가동하는 것이 효율적이다. 특히 정수처리 설비를 포함하여 전력 소비가 큰 정수장의 경우 이러한 전력단가의 변화는 배수지 기준 수위의 유지와 함께 취수 계획 수립 시 가장 중요하게 고려해야 할 요소이다.

Lee and Lee (2015)의 연구에서는 식 (1)을 바탕으로 선형계획법을 활용하여 용수 수요 예측에 따라 가장 낮은 비용으로 정수장을 운영하기 위한 24시간 단위 취수량 결정 최적화 방안을 제안하였다. 해당 최적화 방법에서는 아래의 식 (4)와 같은 목적함수를 통해 24시간의 수요 패턴과 시간당 전력단가를 한번에 고려하여 매 시간의 취수량을 미리 계획함으로써, 달라지는 수요 패턴에도 배수지의 수위가 운영 기준(하한 및 상한 수위)을 벗어나지 않도록 최적의 취수 계획을 수립한다.

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

여기서, R : 정수설비 에너지 효율(KWh/ton), AC_i : i 시간의 전력단가

그러나 기존 최적화 방법에서는 실시간으로 반영되는 24시간 이후의 수요 패턴을 고려할 수 없어, 단위시간(24시간)의 전환 과정에서 최적화 효율이 다소 떨어지는 단점이 있다. 예를 들어 Figure 2에 나타난 것과 같이, Time 1의 수요 패턴을 고려하여 결정된 취수 계획의 경우, Time 1의 용수 수요를 성공적으로 충족할 수 있으나, 모의 후반에 도달하면 Time 2에 예

상되는 용수 수요를 반영하지 않는다. 즉, Time 2의 용수 수요는 Time 1에서 결정된 취수계획이 모두 실행된 후, Time 2 취수계획을 수립하는 시점부터 다시 고려할 수 있으므로, Time 1 종료 시점의 저수량 대비 Time 2의 용수 수요량이 과다할 경우, Time 2에서는 배수지 수위를 유지하기 위해 전력단가가 높은 시간대일지라도 설비 가동률을 높여야 하는 상황이 발생할 것임을 예상할 수 있다.



Figure 2. 단위시간 최적화의 결정변수 구조

이러한 단점을 해결하기 위해서는 매 시간마다 앞으로의 24시간 용수 수요를 고려한 최적 취수계획을 새롭게 수립할 필요가 있다. Kang and Lansey (2009), Jung et al. (2015) 등의 연구에서는 용수공급구역에서 용수 수요 패턴을 고려한 송수펌프, 제수밸브 등의 실시간 운영 최적화 모형을 Figure 3과 같은 Moving window의 형태로 제안한 바 있으며, 본 연구에서는 이를 활용하여 정수장의 실시간 최적 취수량 결정 방법을 제안하였다.

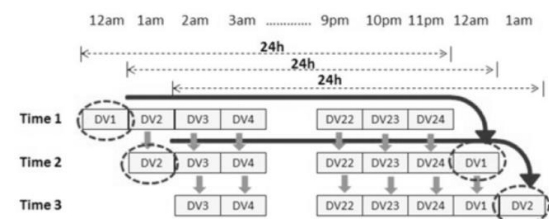


Figure 3. 실시간 최적화의 결정변수 구조

결과 및 논의

본 연구에서는 국내 H 정수장의 정수설비 규모와 용수 수요량, 그리고 국내 시간당 전력 단가를 바탕으로 기존 최적화 방법과 제안된 실시간 최적화 방법의 차이를 비교하였으며, 추가적으로 정수장 설비 규모가 달라짐에 따라 실시간 최적화 방법의 효율이 어떠한 변화를 보이는지 민감도 분석을 수행하였다.

먼저 H 정수장은 취수펌프 및 정수설비 규모에 따라 시간당 최대 15,000 톤의 원수를 취수할 수 있다. 취수 및 정수처리 과정에 소요되는 지연시간은 6시간이며, 따라서 현재 취수된 원수는 6시간 후의 배수지에 공급되어 7시간 후의 배수지 수위에 반영된다. 배수지의 용량은 178,365 톤으로, 38,775 m²의 면적과 4.6 m의 높이의 구조를 갖고 있으며, 운영기준에 따라 3.1 ~ 4.6 m의 범위 내에서 운영된다. 따라서, 정수설비의 규모 및 배수지 운영기준에 따라 최적화 수행 시 다음의 식 (5)~(7)과 같은 제약조건을 적용하였다.

$$P_i \leq 15,000 \text{ m}^3 \quad (5)$$

$$W_i \geq 3.1 \text{ m} \quad (6)$$

$$W_i \leq 4.6 \text{ m} \quad (7)$$

또한, 정수장 설비의 에너지 효율에 따라 단위용수(1톤)의 처리에 소비되는 전력량(R)은 0.07694 kWh이며, 국내 시간대별 전력단가(AC)는 아래의 Table 1과 같다. 수요 예측은 H 정수장의 과거 24시간 실제 수요량을 기준 수요 패턴으로 적용하여, 매 시간 수요량의 $\pm 15\%$ 의 불확실성을 고려한 일주일의 수요 예측을 가정하였다. 일주일 수요량 예측 결과는 Figure 4와 같으며, 이 때 불확실성에 따른 수요량의 변화는 해당 범위 내에서 정규분포를 따르도록 생성하였다.

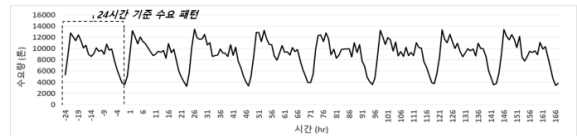


Figure 4. 기준 수요패턴 및 예측 시나리오

Table 1. 사용시간에 따른 전력단가 변화 (KEPCO, 2015)

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

기존 24시간 단위 최적화 방법과 제안된 실시간 최적화 방법의 비교분석은 먼저 기존 최적화 방법을 통해 기준 수요패턴에 해당하는 24시간의 취수량을 결정한 후, 해당 취수계획이 종료되는 시간을 기점으로 일주일의 수요 예측 시나리오를 1) 계속해서 기존 방법으로 취수량을 결정한 결과와 2) 제안된 방법으로 변경하여 취수량을 결정한 결과로 각각 도출하여 비교하였다. 아래의 Figure 5는 두 가지 방법을 통해 수립된 취수량 결정 결과이며, Figure 6은 각각의 취수계획에 따른 배수의 수위 변화를 나타낸 그림이다.

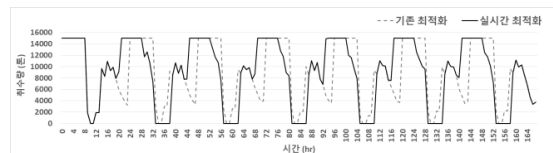


Figure 5. 최적화 방법별 취수량 결정 결과

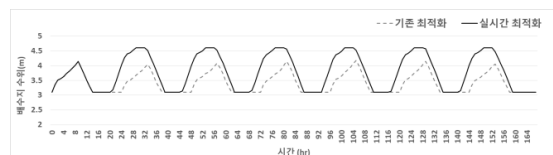


Figure 6. 최적화 방법별 배수지 수위 예측

각 최적화 방법에 따른 정수장 운영 결과의 비교는 1) 운영비용, 2) 배수지 운영의 안정성, 3) 배수지 운영의 탄력성 등 세 가지 측면으로 분석하였으며, 각각 Table 2와 같은 결과를 보였다. 이 때, 배수지 운영의 안정성은 배수지의 수위가 모의기간 동안 하한수위에 도달한 횟수를 통해 분석하였으며, 배수지 운영의 탄력성은 제한된 정수설비를 전력단가에 따라 최대한 효율적으로 운영하기 위해 배수지의 용량을 활용하는 성능을 의미하므로, 같은 기간 동안 배수지의 수위가 상한수위에 도달한 횟수를 통해 분석하였다.

Table 2. 단위시간 및 실시간 최적화 결과 비교

분석 지표	24시간 단위 최적화 방법	실시간 최적화 방법
운영비용(원)	8,359,233	7,905,026
운영 안전성 (하한수위 횟수)	76	47
운영 탄력성 (상한수위 횟수)	0	24

분석 결과, 실시간 최적화 방법을 적용함에 따라 일주일 운영비용은 약 454 천원 감소(약 5.4 % 감소율)하는 것으로 나타났으며, 하한수위 도달 횟수는 29회 감소(약 38.2 % 감소율)하였고, 상한수위 도달 횟수의 경우 기존 방법에서는 상한수위에 도달하지 못하였으나, 제안된 방법을 적용한 결과 24회 도달(모의기간 대비 약 14.3 %)하는 것으로 분석되었다. 특히, 기존 방법을 적용하였을 시 배수지의 수위는 4.6 m의 상한수위 중 최고 4.17 m에 그친 것에 비해, 제안된 방법에서 3.1 m부터 4.6 m까지의 최저 및 최고 수위를 모두 나타낸 것은 배수지의 용량을 100 % 활용하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

또한, 본 연구에서는 정수장 설비 중 배수지 용량을 확대함에 따라 실시간 최적화 방법의

적용 효율이 어떠한 변화를 보이는지 민감도 분석을 수행하였다. 배수지의 확장은 정수장 면적 및 운영수위 조건 등을 감안하여 탱크의 높이를增高시키는 것으로 모의하였으며, 따라서 상한수위를 기존의 4.6 m부터 0.2 m 간격으로 5.4 m까지 총 다섯 가지의 단계로 구분하여 비교분석 하였다. 배수지 확장에 따른 실시간 최적화 방법의 효율 분석은 앞서 분석한 바와 같이 운영비용, 운영 안정성, 운영 탄력성의 세 가지 측면에서 분석하였으며 각각 Table 3과 같은 결과를 보였다.

Table 3. 배수지 상한수위에 따른 최적화 효율

배수지 상한수위 (m)	운영비용 (원)	운영안정성 (하한 횟수)	운영탄력성 (상한 횟수)
4.6 (기존)	8,359,233	76	0
4.6 (제안)	7,905,026	47	24
4.8 (제안)	7,823,852	43	19
5.0 (제안)	7,758,086	34	18
5.2 (제안)	7,723,769	22	12
5.4 (제안)	7,709,683	16	1

먼저 운영비용의 감소 추이를 분석한 결과 배수지 상한수위가 4.8 m일 때 기존 대비 535 천원(6.4 %), 5.0 m일 때 601 천원(7.2 %), 5.2 m일 때 635 천원(7.6 %), 마지막으로 5.4 m일 때 650 천원(7.8 %)의 운영비용이 감소하여, 배수지의 용량이 클수록 실시간 최적화 방법 적용에 따른 경제적 효율이 증가하고 있음을 알 수 있다.

배수지 운영의 안정성 분석을 위한 모의기간 내 하한수위 도달 빈도는 기존 방법의 76 회 대비 상한수위가 4.8 m일 때 34회(44.7 %), 5.0 m일 때 42회(55.2 %), 5.2 m일 때 54회(71.1 %), 마지막으로 5.4 m일 때 60회(78.9 %) 감소하여 역시 배수지의 용량이 클수록 운영수위를 더 안정적으로 유지하는 것으로 나타났다.

배수지 운영의 탄력성 분석을 위한 모의기간 내 상한수위 도달 빈도는 전체 모의기간

168회 대비 상한수위가 4.8 m일 때 19회 (11.3 %), 5.0 m일 때 18회(10.7 %), 5.2 m일 때 12회(7.1 %), 마지막으로 5.4 m일 때 1회(0.6 %) 발생하여, 배수지의 용량이 클수록 운영 탄력성 효율은 점차 감소하며, 특히 상한수위가 5.4 m를 초과할 경우 실시간 최적화 방법을 적용하여도 배수지 용량을 100% 활용하지 못하는 것으로 분석하였다.

결론

원활한 상수도의 공급을 위해 정수장에서는 원수의 취수 및 정수처리 등으로 인한 지연시간을 고려하여, 예측 수요량과 배수지의 수위를 동시에 만족시킬 수 있는 취수계획을 수립하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 시설 운영조건과 함께, 운영시간에 따른 전력단가를 고려하여 실시간으로 취수계획을 최적화할 수 있는 모형을 개발하였다. 국내 H 정수장을 대상으로 개발 모형을 적용하고 이를 기존 최적화 방법과 비교 분석한 결과, 개발 모형은 기존 모형 대비 운영비용 절감, 배수지 운영의 안정성, 배수지 운영의 탄력성 등의 측면에서 모두 기존 모형 대비 개선된 결과를 보였다.

또한 정수장 설비의 규모 변화에 따른 실시간 최적화 모형의 적용 효과를 분석하기 위해, 배수지를 확장하여 상한수위가 점차 증가하는 경우에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 분석 결과 운영비용 절감, 정수장 운영의 안정성은 배수지의 상한수위가 증가할수록 더욱 큰 효율을 보이는 것으로 분석되었다. 반면, 운영 탄력성은 배수지의 상한수위가 증가할수록 효율이 점차 감소하였으며, 일정 수위를 넘어서는 시점에서 더 이상 개선되지 않는 특징을 보였다. 본 연구의 결과는 향후 합리적인 수요 예측 등 시나리오 다양성을 보완함으로써 정수장 설비의 운영 및 시설보강 계획 수립 과정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0020576)

참고문헌

- [1] 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*, 2013.
- [2] Zhao, T., and Zhao, J. (2014). Optimizing operation of water supply reservoir: the role of constraints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- [3] ShahiriParsa, A., Noori, M., Heydari, 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*, 9(3), 906-917.
- [4] Lee, C., and Lee, K. (2015). Determination of Optimal Hourly Water Intake Amount for H Arisu Purification. *한국수자원학회 논문집*, 48(12), 1051-1064.
- [5] 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*, 136(4), 463-473.
- [6] 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*, 19(7), 1987-1993.
- [7] KEPCO (2015). Electricity Rate Table.