

불확실성을 고려한 하수처리수 재이용 관로의 최적화

Optimization of Water Reuse System under Uncertainty

정건희* / 김태웅** / 이정호*** / 김종훈****

Chung, Gunhui / Kim, Tae-Woong / Lee, Jeong Ho / Kim, Joong Hoon

Abstract

Due to the increased water demand and severe drought as an effect of the global warming, the effluent from wastewater treatment plants becomes considered as an alternative water source to supply agricultural, industrial, and public (gardening) water demand. The effluent from the wastewater treatment plant is a sustainable water source because of its good quality and stable amount of water discharge. In this study, the water reuse system was developed to minimize total construction cost to cope with the uncertain water demand in future using two-stage stochastic linear programming with binary variables. The pipes in the water reuse network were constructed in two stages of which in the first stage, the water demands of users are assumed to be known, while the water demands in the second stage have uncertainty in the predicted value. However, the water reuse system has to be designed now when the future water demands are not known precisely. Therefore, the construction of a pipe parallel with the existing one was allowed to meet the increased water demands in the second stage. As a result, the trade-off of construction costs between a pipe with large diameter and two pipes having small diameters was evaluated and the optimal solution was found. Three scenarios for the future water demand were selected and a hypothetical water reuse network considering the uncertainties was optimized. The results provide the information about the economies of scale in the water reuse network and the long range water supply plan.

Keywords : Water reuse system, Two-stage stochastic linear programming, Water supply in future

요 지

다양화되는 물 수요와 기상 이변 등의 영향으로 극심해지는 가뭄에 대비하여 대체 수자원의 확보는 수자원 연구의 매우 중요한 부분이 되었다. 다양한 대체 수자원 중 하수처리장의 방류수는 양호한 수질과 비교적 예측이 가능한 방류량으로 인해 농업용수나 공업용수 혹은 공공용수를 대체할 안정적인 수원으로 관심의 대상이 되고 있다. 본 연구에서는 하수처리수 재이용을 위해 미래의 불확실한 용수 수요량을 고려한 최소의 공사비를 최적화하는 방법을 이

* 정희원, 고려대학교 방재과학기술연구센터 연구교수
Research Professor, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University, Seoul 136-713, Korea

** 교신저자, 정희원, 한양대학교 건설환경시스템공학전공 조교수
Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea
(e-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

*** 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**** 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수
Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

진변수를 가지는 2단계 추계학적 선형계획법을 이용하여 제시하였다. 현재 설계하는 하수처리수 재이용 모형은 미래의 용수 수요량까지 고려하여 설계하여야 한다는 점을 고려하여, 미래에 용수수요가 증가할 경우, 기존의 관에 평행한 다른 관을 추가로 건설할 수 있다고 가정하여 2단계에 걸쳐 공사가 가능한 모형을 구축하였다. 그 결과 미래의 물 사용량까지를 모두 고려하여 현재 큰 직경의 관로를 건설하는 경우와 작은 직경의 관로를 두 번에 걸쳐 건설하는 대안 사이의 비용차이를 고려한 모형이 제안되었으며, 가상의 네트워크에 적용되어 그 적용성을 입증하였다. 제안된 모형은 하수 처리수 재이용 네트워크 계획 시 경제적인 관로 설계를 위한 기본 자료로 활용될 수 있으며, 장기적인 물 공급 계획을 수립할 시 여러 가지 설계 대안들에 대한 비교를 위해도 사용이 가능하다.

핵심용어 : 하수처리장 처리수 재이용, 이단계 추계학적 선형계획법, 미래용수공급

1. 서 론

최근 변화되는 기후의 영향으로 연간 총 강우량이 비슷함에도 불구하고, 시간적으로나 지역적으로 편중된 강우가 예전보다 더욱 빈번히 발생되며, 이는 극심한 홍수나 가뭄의 빈번한 발생으로 이어지고 있다. 특히 상수관망의 높은 누수율로 인해 효율적인 용수공급이 이루어지지 않는 강원도 산간지역에서는 타 지역에 비해 극심한 물 부족 현상이 일어나고 있는 실정이다. 이러한 물 부족 현상을 해결하기 위해 중앙정부나 지역 자치단체에서는 다양한 해결방안을 모색하고 있다. 여러 가지 대안 중 하나의 대안으로 하수처리장에서 방류되는 방류수를 농업용수나 공업용수로 재이용하는 방안도 모색될 수 있다. 실제로 연간 64억 톤씩 거의 일정한 양이 방류되고 있고, 고도처리 등을 거쳐 양호한 수질을 가진 하수처리수가 안정적인 대체수자원으로 사용이 매우 높으며, 현재 환경과피논란 및 수물지역 주민들의 반대여론에 부딪혀 주춤하고 있는 댐이나 저수지에 의한 수자원 확보를 대체할 수 있는 수자원으로서 그 적용성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 2006년 이후 하수처리수 재이용 시범사업이 진행 중에 있다. 그러나 연구의 대부분이 적절한 수질 기준 제시나 인체의 유해성 분석으로 집중되어 있으므로, 그 시스템의 구조적인 설계에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

하수처리수의 재이용은 크게 장내 재이용과 장외 재이용으로 나누어지는데, 장내 재이용은 유출수를 다시 하수처리장의 공정에 재사용하는 것을 의미하며, 장외 재이용은 유출수를 이용하여 공업용수나 농업용수 혹은 하천유지용수로 재이용하는 것을 일컫는다. 하수 처리수의 장외 재이용 시스템은 재오염 방지를 위해 개수로 보다는 관로를 이용하여 구축하며, 경제성을 고려하여 수지상형으로 구축하는 경우가 가장 많다. 그러므로 수지상형의 처리수 재이용 시스템 건설시 공사비를 최소화하면서 필요한 물 수요량을 충분히 공급할 수 있는

최적의 시스템을 설계하는 것이 매우 중요하다.

하수처리수 재이용을 위해 관망을 이용한 시스템 건설이 일반적이므로, 이는 압력흐름으로 해석이 가능하다. 압력흐름은 관내 흐름에 의해 발생하는 마찰손실과 점함부나 밸브 등 장치가 설치된 지점에서의 수두손실이 가장 큰 에너지 손실을 일으킨다. 그러므로 이러한 비선형성을 가진 에너지 손실을 고려하기 위해 초기에는 관망의 흐름해석을 간략화한 후, 비선형계획법이나 선형계획법으로 최적화를 시도하는 연구가 다수 수행되었다(Gupta, 1969; Gupta and Hassan, 1972; Alperovits and Shamir, 1977; Quindry *et al.*, 1981; Bhave and Sonak, 1992). 그러나 간략화된 관망해석으로는 정확한 해석이 불가능하므로, 보다 정확한 에너지 손실을 고려하고, 관내 지점의 압력조건까지 고려할 수 있는 관망해석 프로그램(EPA-NET, KY-PIPE 등)을 최적화 모델과 연계하여 그 최적해를 찾기 위한 시도가 주로 유전자 알고리즘 등의 추계학적 탐색기법을 이용하여 시도되었다(Simpson *et al.*, 1994; Savic and Walters, 1997; Eusuff and Lansey, 2003). 그러나 이러한 기법은 계산시간이 매우 길어 실무에 적용이 매우 어려우며, 전역해를 찾기 못하고 국지해에 머무르는 경우가 많다. 그러므로 관망해석의 선형화를 위해 Gupta and Hassan (1972)은 기존의 관경을 결정변수로 해석하던 관망해석을 탈피하여, 관망 내 각 관로에 건설될 수 있는 가능한 관경을 미리 설정한 후, 각 관경의 설치길이를 결정변수로 하는 관망해석을 제안하였다. 선형화된 시스템은 매우 빠른 시간에 전역해에 가까운 해를 찾을 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 자주 하나의 관로에 두 개 이상의 관경이 선택되는 단점을 가지고 있었다. 그러므로 Samani and Mottaghi (2006)는 하나의 관로에 하나의 관경만을 선택하도록 하는 제약 조건을 추가하여 새로운 선형관망해석을 시도하였다. 그러나 역시 추계학적 탐색기법을 이용하여 모형을 해석함으로써 그 계산시간이 오래 걸리고 관망해석에 필수적으로 동반되어야 하는 불확실성을 고려하지 못하

었다는 단점이 있었다.

본 연구에서는 기존의 제안된 선형화기법을 개량하고 마찰손실에 의해 발생하는 에너지손실을 Hazen-Williams 공식을 이용하여 고려하여, 관망해석프로그램과의 연계가 없이도 최적화가 가능하며 미래 물수요량의 불확실성을 고려한 수지상형 하수처리수 재이용 모형을 구축하였다. 구축된 모형은 가상의 하수 처리수 모형에 적용이 되었으며, 그 최적설계를 위한 환경이 제시되었다. 이는 관망해석프로그램과의 연계가 없이도 최적해를 매우 빠르게 찾을 수 있으며, 이진형 변수를 가지는 선형모형이므로 구해진 해 또한 전역해에 가까운 값을 가진다.

2. 처리수 재이용 모형

제안된 처리수 재이용 모형을 네트워크 $G=(I, J)$ 로 나타낼 때, I 는 전체 네트워크를 구성하는 관로를 나타내며, J 는 각 관로의 건설관경을 나타낸다. 처리수 재이용 모형은 대부분 기존의 하천으로 방류되어 유실되는 유량을 재이용하는 것이 목적이므로, 기존의 관로 시스템이 존재하지 않는 것으로 가정하였으며, 관로의 네트워크는 수지상형으로 가정하였다.

건설 가능한 상업용 관의 직경을 미리 가능한 해의 집합으로 설정한 후, 해당 관경을 가지는 관이 관로에 건설될 것인지 아닌지를 나타내는 이진변수를 결정변수로 지정하였다. 건설 가능한 관경이 해당 관로에 건설되었을 때의 에너지 손실은 Hazen-Williams 공식을 이용하여 계산하였다. 제안된 하수처리수 재이용 모형의 목적함수는 총 공사비의 최소화이며, 관의 건설은 총 2단계에 의해 이루어질 수 있다고 가정하였다. 즉, 현재의 하수처리수 사용자들의 용수사용량을 알고 있을 때, 공사가 진행될 수 있고, 미래의 물 사용량이 증가하거나 감소하는 경향을 고려하여 다시 확장이 가능하다. 그러나 미래의 물사용량은 현재시점에서 정확히 예측이 불가능하므로 불확실성을 가진다. 그 결과 미래 물수요량 시나리오에 따라 현재 최적시스템의 설계가 가능한 모형을 이진변수를 가지는 2단계 선형계획법을 이용하여 최적화하였다.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} cL_i D_{ij}^{1.1} x_{ij} + E[h(x, \tilde{\xi})] \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad \forall i, \quad (2)$$

$$\sum_{i: i \in \text{UP}_1} \sum_{j \in J} S_{ij} L_i x_{ij} \leq \sum_{i: i \in \text{UP}_1} z_i + RL - H, \quad \forall i, \quad (3)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \quad (4)$$

$$\text{where, } E[h(x, \tilde{\xi})] = \min_{y, \alpha} d \sum_{\omega \in \Omega} r^\omega \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} cL_i D_{ij}^{1.1} y_{ij}^\omega \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in J} y_{ij}^\omega \leq 1, \quad \forall i, \forall \omega \quad (6)$$

$$\sum_{i: i \in \text{UR}} \sum_{j \in J} \sum_{j' \in J} (G_{ijj'}^\omega - S_{ij}^\omega) L_i \alpha_{ijj'}^\omega \leq \quad , \forall i, \forall \omega \quad (7)$$

$$\sum_{i: i \in \text{UR}} z_i + RL - H - \sum_{i: i \in \text{UR}} \sum_{j \in J} S_{ij}^\omega L_i x_{ij} \quad (8)$$

$$\alpha_{ijj'}^\omega - y_{ij'}^\omega \leq 0, \quad \forall i \forall j \forall j' \forall \omega \quad (9)$$

$$\alpha_{ijj'}^\omega - x_{ij} \leq 0, \quad \forall i \forall j \forall j' \forall \omega \quad (10)$$

$$x_{ij} + y_{ij'}^\omega - \alpha_{ijj'}^\omega \leq 1, \quad \forall i \forall j \forall j' \forall \omega \quad (11)$$

$$y_{ij'}^\omega = \{0, 1\}, \quad \forall i \forall j' \forall \omega \quad (12)$$

$$\alpha_{ijj'}^\omega = \{0, 1\}, \quad \forall i \forall j \forall j' \forall \omega \quad (12)$$

여기서, L 은 관로의 길이, D 는 관의 직경, S 는 단위길이 당 마찰손실, c 는 공사비 계산을 위한 계수, 그리고 x 와 y 는 이진변수이다.

관로의 집합인 I 는 특정관로의 흐름 방향을 고려할 때 상류에 위치하는 관로들의 집합인 UP 를 하위 집합으로 가지며, 네트워크의 개별 관로 i 를 요소로 가진다. 관직경을 나타내는 집합인 J 는 첫 번째 건설기간에 건설가능한 관직경 j 와 두 번째 건설기간에 건설가능한 관직경 j' 을 요소로 가진다. 각 건설기간에 건설가능한 관직경인 j 와 j' 은 같은 관직경을 원소로 가지는 동일집합일 수도 있고 다른 관직경을 원소로 가질 수도 있다. 또한 두 번째 건설기간의 수요량의 불확실성을 고려하기 위한 시나리오의 집합을 Ω 로 나타내고 그 요소는 ω 를 가진다.

결정변수는 첫 번째 건설기간에 관경 j 를 가지는 관을 관로 i 에 설치할 것인가를 결정하는 이진변수 x_{ij} , 두 번째 건설기간에 관경 j' 을 가지는 관을 관로 i 에 설치할 것인가를 나타내는 이진변수 $y_{ij'}^\omega$, $x_{ij} y_{ij'}^\omega$ 을 선형화하기 위한 변수 $\alpha_{ijj'}^\omega$ 이다. 시스템의 목적함수는 2단계로 구성된 공사비를 최소화(Eq. (1))하는 것이며, 두 번째 건설기간의 공사비는 현재가치로 환산하기 위한 할인요소 (d)를 고려한 기댓값(Eq. (5))으로 계산한다. 공사비

의 계산을 위한 계수는 c 로 나타내고, 각 관로의 길이 L_i , 건설된 관로의 직경 D_{ij} 를 이용하여 공사비를 계산한다. 시스템의 목적함수는 Boulos *et al.* (2006)을 참고하였으며, 계수 c 는 100을 사용하였다.

첫 번째 건설기간의 결정변수는 관로 i 에 관경 j 를 가지는 관이 건설될 경우 1을, 건설되지 않을 경우 0을 가지는 이진변수 x_{ij} 이다. Eq. (2)는 관로 i 에 건설되는 관경은 한가지여야 한다는 제약조건이며, Eq. (3)은 모든 절점에서의 압력은 최소요구압력(H)보다 커야 한다는 제약조건이다. 좌변은 수원의 총 에너지(RL)에서 물이 흘러온 경로를 통하여 관로 i 의 끝 노드까지의 Darch-Weisbach 공식을 이용한 마찰손실을 나타내며, 이때 관로 i 의 끝 노드의 표고는 z_i 이다. 여기서 S_{ij} 는 관로 i 에 관경 j 가 건설되었을 경우에 발생하는 단위길이 당 마찰손실을 Hazen-Williams 공식으로 계산한 값으로 다음과 같이 계산된다.

$$S_{ij} = \frac{10.66q_i^{1.852}}{C_{HW}^{1.852}D_{ij}^{4.871}} \quad (13)$$

여기서, C_{HW} 는 Hazen-Williams 마찰계수이며, q_i 는 관로 i 에 흐르는 유량이다. 처리수 재이용 시스템을 건설하는 시점에서는 모든 지점에서의 수요량을 알고 있으며, 수요량을 모두 공급한다는 가정을 하였으므로, 수지상형의 관로에서 각 관에 흐르는 유량은 미리 알 수 있다. Eq. (4)는 결정변수 x_{ij} 가 이진변수임을 나타낸다.

두 번째 건설기간의 목적함수는 공사비 기댓값의 최소화(Eq. (5))이며, 두 번째 건설기간의 결정변수는 y_{ij}^ω 으로 수요량 시나리오가 ω 일 때, 관로 i 에 관경 j 를 가지는 관이 건설될 경우 1, 건설되지 않을 경우 0을 취하는 이진변수이다. 두 번째 공사기간의 공사비 기댓값 계산을 위해 발생 가능한 수요량의 시나리오별 확률은 r^ω 로 계산한다. 두 번째 건설기간에 건설하는 관경 j' 역시 하나의 관로에 하나만 선택되어야 한다 (Eq. (6)). 그러나 Eq. (2)와 달리 부등호인 것은 현재의 수요량을 충족시키기 위해 반드시 관이 건설되어야 하는 첫 번째 기간과 달리, 두 번째 건설기간에 새로운 관이 건설될 수도 있고, 기존의 관을 그냥 사용할 수도 있기 때문이다.

Eq. (7)에 세 번째 결정변수인 $a_{ijj'}$ 이 나타나는데, 이는 첫 번째 결정변수인 x_{ij} 와 두 번째 결정변수인 y_{ij} 의 곱으로 정의되며, 관로 i 에 첫 번째 건설기간에 관경 j 를 가지는 관이, 두 번째 건설기간에 관경 j' 를 가지는 관이 건설되었을 경우에는 1, 그렇지 않은 경우에는 0을 가진다. 두 번째 건설기간에는 평행관이 건설되었다

면 평행관을 따라 생기는 마찰손실은 둘 중 하나의 관만을 계산하면 되므로, $G_{ijj'}$ 을 계산하여 관로 i 에 첫 번째 건설기간에 관경 j 가 건설되고, 두 번째 건설기간에 관경 j' 가 건설되었을 때, 두 번째 건설된 관경 j' 에 유량 r_i 가 흐를 경우 생기는 마찰손실을 Hazen-Williams 공식으로 계산한 것이다.

$$G_{ijj'} = \frac{10.66r_i^{1.852}}{C_{HW}^{1.852}D_{ij}^{4.871}} \quad (14)$$

여기서, r_i 는 두 번째 기간에 건설된 관경 j' 관로를 통해 흐르는 유량으로서, 첫 번째 기간에 건설된 관경 j 관로를 통해 흐르는 유량과 합쳐 전체 관로 i 를 흐르는 유량 q_i 가 된다. 총 수요량을 모두 만족시킨다는 가정 하에서 역시 총 유량 q_i 가 계산가능하므로 관경 j 와 j' 의 경우에 두 관로를 흐르는 유량의 분배가 가능하다.

두 번째 건설된 관경 j' 에 흐르는 유량을 r_i 라고 하면 전체 유량 q_i 에서의 비를 $f_{ijj'}^\omega$ 으로 나타낼 수 있으며 다음 식으로 계산이 가능하다.

$$f_{ijj'}^\omega = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{ij}}{D_{ij'}}\right)^{2.63}} \quad (15)$$

여기서, D_{ij} 는 첫 번째 건설기간에 관로 i 에 건설된 관경 j 이며, $D_{ij'}$ 은 두 번째 건설기간에 관로 i 에 건설된 관경 j' 이다. 그러므로 $r_i^\omega = f_{ijj'}^\omega q_i$ 을 이용하여 시나리오 ω 에서 관로 i 에 관경 j 와 j' 가 건설되었을 경우, 관경 j' 에 흐르는 유량을 계산할 수 있다. 그 결과 관경 j' 에 흐르는 유량 k_i 는 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$k_i = (1 - f_{ijj'}^\omega)q_i \quad (16)$$

Eq. (7)에서 좌변은 두 번째 건설기간에 건설된 새로운 관이 있을 경우에만 $\alpha_{ijj'}^\omega$ 이 1을 가지므로, 두 번째 건설기간에 건설된 관경 j' 관을 통해 흐르는 유량을 이용해 계산된 단위길이당 마찰손실 $G_{ijj'}$ 을 이용하여 각 지점에서의 수두를 계산한다. 전체 관로 i 를 흐르는 유량을 이용해 계산된 단위길이당 마찰손실 S_{ij} 는 좌변과 우변에 모두 나타나므로 서로 지워진다. 그러나 두 번째 건설기간에 새로운 관 j' 가 건설되지 않을 경우에는 $\alpha_{ijj'}^\omega$ 이 0을 가지므로 좌변이 모두 0이 된다. 그 결과 식 (7)은 식 (3)과 같은 형태가 되며 첫 번째 기간에 건설된 관경 j 관을 통해 흐르는 총 유량 q_i 를 이용하여 단위 길이당 마찰손실을 계산한다.

Eqs. (8)~(10)은 두 결정변수의 곱인 a_{ij} 를 선형화하기 위해 추가된 제약조건이다. Eqs. (11)~(12)는 이진변수임을 나타내며, 세 번째 결정변수는 Eqs. (8)~(10)에 의해 자동으로 이진변수가 되지만, 명확한 기술을 위해 Eq. (12)를 삽입하였다. 본 모형에서는 관말에서의 최소요구압력을 30psi로 제한하였다. 최종적으로 구성된 모형은 이진변수를 가지는 2단계 추계학적 선형 계획법(two-stage stochastic linear programming with recourse and binary variables)이며 GAMS/CPLEX (<http://www.gams.com/solvers/solvers.htm#CPLEX>)를 이용하여 최적화를 시행하였다.

3. 모형의 적용

제안된 하수처리수 재이용을 위한 네트워크 설계모형을 적용하기 위해 가상의 수원과 사용자 네트워크를 설계하였다. 가상의 시스템에는 하나의 하수처리장이 수원으로 존재하며, 총 10개의 농업지역, 공업지역, 공공지역의 사용자가 존재한다. 처리수 재이용을 위한 관로의 경로는 수지상형으로 이미 결정되어 있고, 미래의 불확실한 사용량을 고려하여 최적의 물 공급을 위한 관경의 결정을 목적으로 한다(Fig. 1). 가상 시스템의 가능한 관로는 총 10개로 수원에서부터 사용자까지 수지상형으로 연결된다(Tables 1 and 2). 각 관로는 2단계에 의해 건설(연도 0와 6)이 가능하며, 건설 시기는 최적 설계 결과에 의해 좌우된다. 앞에서 언급한 바와 같이 각 사용자들은 기존에 하수처리수가 아닌 다른 수원에서 물 수요를 공급받고 있었다고 가정하였으므로, 첫 번째 건설기간(연도 0) 전에는 처리수 재이용을

위한 기반시설이 존재하지 않는다고 가정하였다. 그러므로 각 관로는 첫 번째 건설기간에 모두 건설되어, 모든 물 사용자가 필요한 물 수요량을 두 번째 건설기간까지 공급받도록 하여야 한다. 이때 건설되는 10개의 관로는 순서대로 1a, 2a, ..., 10a 라고 정의한다. 각 관로에 설치 가능한 관경의 집합은 500, 600, 800, 900, 1000 mm로 정의된다. 같은 집합의 설치 가능한 관경들이 첫 번째 건설된 후 6년 후인(연도 6) 두 번째 건설 기간에 첫 번째 건설된 관에 평행한 관의 형태로 설치 가능하다는 가정 하에 두 번째 건설기간의 최적해를 구하고, 이때 구해진 최적 관경을 가진 관로를 순서대로 1b, 2b, ..., 10b 라고 정의한다. 평행한 관의 설치하는 하나의 관이 파괴나 정기점검 등의 이유로 차단되었을 때, 수지상형의 관로에서 하류 노드들에 제한된 양이라도 물 공급이 가능하도록 하기 위해 매우 중요하며, 현실적인 대안이다.

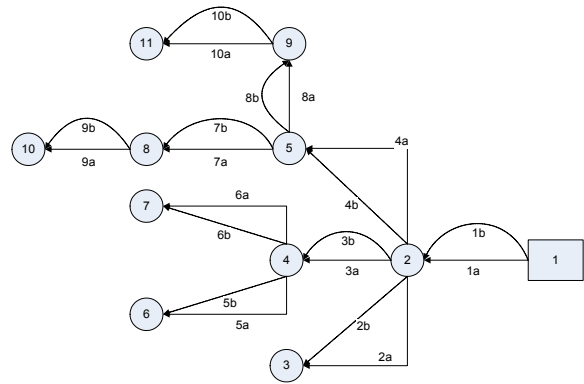


Fig. 1. Hypothetical Water Reuse System (정건희 등, 2009)

Table 1. Node Information of the Example Water Reuse System

Node ID	Elevation (m)	Demand in period 1 (m ³ /s)	Demand in period 2 (m ³ /s)		
			Low flow	Average flow	High flow
1	200	0	0.000	0.000	0.000
2	100	0.140	0.224	0.280	0.336
3	60	0.245	0.392	0.490	0.588
4	100	0.140	0.224	0.280	0.336
5	160	0.070	0.112	0.140	0.168
6	60	0.140	0.224	0.280	0.336
7	125	0.088	0.140	0.175	0.210
8	110	0.158	0.252	0.315	0.378
9	180	0.245	0.392	0.490	0.588
10	130	0.088	0.140	0.175	0.210
11	185	0.123	0.196	0.245	0.294

Table 2. Link Information of the Example Water Reuse System

Link ID	Start node	End node	Length (m)	Flowrate in period 1 (m ³ /s)	Flowrate in period 2 (m ³ /s)		
					Low flow	Average flow	High flow
1	1	2	1,000	1.435	6.888	8.610	10.332
2	2	3	1,300	0.245	1.176	1.470	1.764
3	2	4	800	0.368	1.764	2.205	2.646
4	2	5	1,200	0.683	3.276	4.095	4.914
5	4	6	1,000	0.140	0.672	0.840	1.008
6	4	7	1,200	0.088	0.420	0.525	0.630
7	5	8	1,200	0.245	1.176	1.470	1.764
8	5	9	400	0.368	1.764	2.205	2.646
9	8	10	1,000	0.088	0.420	0.525	0.630
10	9	11	700	0.123	0.588	0.735	0.882

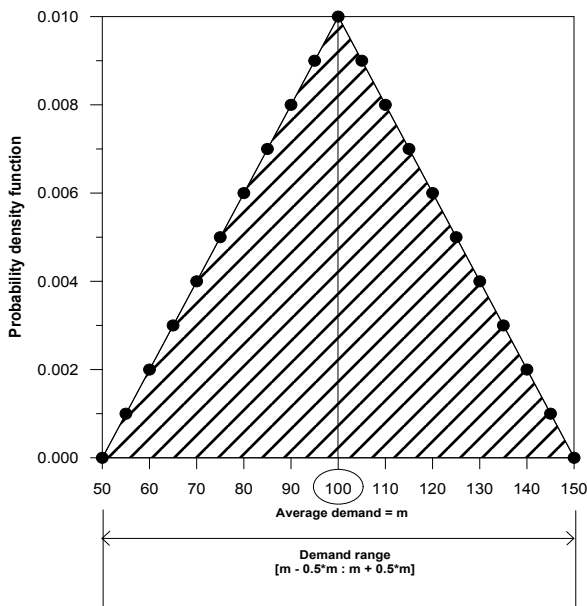


Fig. 2. Example of Probability Density Function of Future Water Demand in Symmetric Triangular Distribution

최적의 시스템 설계는 미래 물수요의 예측을 수반하므로, 예측의 불확실성을 고려한 시스템의 설계가 필수적이다. 그러므로 시스템의 설계 시 현재 수요량을 기반으로, 미래 물수요량은 현재 수요량을 평균(m)으로 하고, 평균의 두 배를 총 범위[0.5m, 1.5m]로 가지는 대칭의 삼각형 확률분포함수를 가진다고 가정하였다. Fig. 2는 평균 용수수요량이 100일 경우의 대칭 삼각형 확률분포함수를 나타낸다. 가정된 수요량 확률분포함수에서 평균, 평균에서 30% 작은 수요량과 30% 큰 수요량을 가지는 경우를 기준수요, 저수요, 고수요 시나

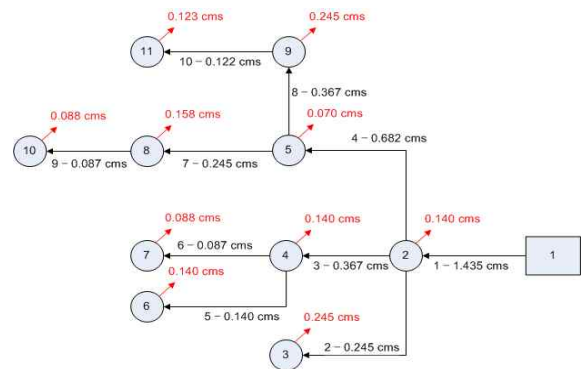


Fig. 3. Optimized flowrates in period 1 (no uncertainty is involved.)

리오로 정의하고 해당 시나리오의 발생확률은 누적 확률분포함수에서 계산하였다. 각 시나리오별 수요량은 Table 1에 이때 각 관로를 흐르는 유량은 Table 2에 나타나 있다.

4. 결과 및 토의

제안된 하수처리수 재이용 모형을 가상의 네트워크에 적용하여 Branch-and-Cut 알고리즘을 이용하는 GAMS/CPLEX를 이용하여 최적화하였다. CPLEX는 ILOG사의 CPLEX 알고리즘을 기반으로 한 선형계획법, 혼합정수법 등을 풀기 위한 방법이다. 이는 선형계획법을 풀기 위한 Simplex 방법과 혼합정수계획법을 풀기 위한 Branch-and-Bound 방법이 공존한다. Fig. 3은 불확실성을 고려하지 않았을 경우인 연도 0의 유량 배분을 나타낸다. 이때 최적화된 관경은 Table 3과 같다. 첫 번째 기간에는 모든 물 수요를 알고 있다고 가정하므로, 현재의 물수요량과 미래에 변화될 물수요 시나

리오를 고려하여 관경이 결정되며, 이때 공급되는 물은 총 수요량과 같다. 반면 Fig. 4에 나타나 있는 두 번째 공사기간에 관내를 흐르는 유량은 시나리오별로 다르다. 저수요, 기준수요, 고수요 시 관내를 흐르는 유량을 나타내며 이를 대비하기 위해 건설되어야 하는 관경은 Table 3과 같다.

수지상형 관로의 특성상 1번 관로는 저수요, 기준수요, 고수요 때 모두 평행관이 건설되어 들어나는 물 수

요를 충족시켜 주어야 한다. 자세히 살펴보면, 저수요에 대비하기 위해서는 하나의 관 (1번 관로) 만을 두 번째 건설기간에 건설하고, 기준수요에 대비하기 위해서는 1번과 4번 관로들을 건설하고, 마지막으로 고수요에 대비하기 위해서는 총 5개의 관로 (1, 3, 4, 7, 8번 관로)를 두 번째 기간에 새로 건설하여야 한다. 이렇게 3가지의 시나리오를 대칭형 삼각형 분포형에서 고려한 경우의 총 기대 공사비는 17억 원(Table 3)이다.

Table 3. Optimized Pipe Diameters Constructed in Period 1 and 2

Pipe ID	Optimized pipe diameters (mm) and construction cost (₩×10 ⁵)			
	First period	Second Period		
		Low water demand	Average water demand	High water demand
1	1,000 (1,995*)	800 (1,561)	1,000 (1,995)	1,000 (1,995)
2	600 (1,479)	-	-	-
3	600 (910)	-	-	500 (745)
4	1,000 (2,394)	-	600 (1,365)	1,000 (2,394)
5	500 (931)	-	-	-
6	500 (1,117)	-	-	-
7	600 (1,365)	-	-	500 (1,117)
8	900 (711)	-	-	1,000 (798)
9	500 (931)	-	-	-
10	900 (1,244)	-	-	-

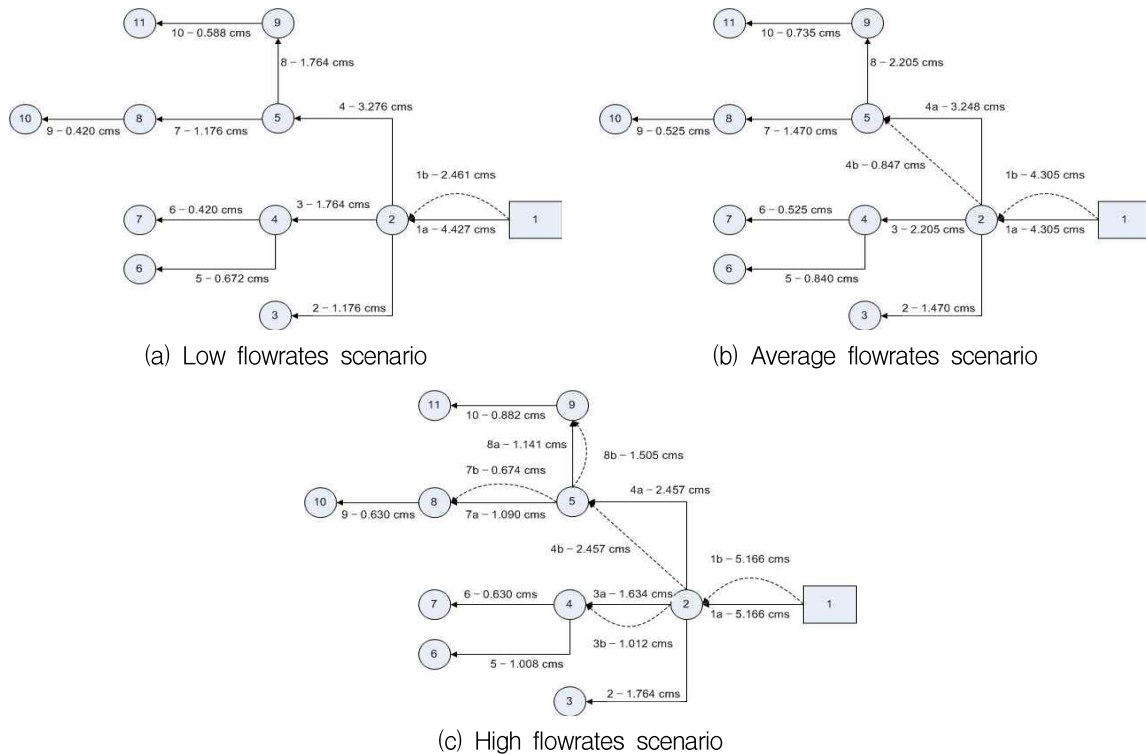


Fig. 4. Optimized Flowrates in Period 2

5. 결 론

본 연구는 대체 수자원으로 각광받고 있는 하수처리수의 농업용수, 공업용수, 공공용수로의 재사용을 위한 시스템의 구축을 위해, 최소의 공사비용으로 미래의 불확실한 용수수요량까지 고려하는 설계를 위한 모형을 개발하였다. 이를 위해 기존에 재사용이 되지 않고 하천으로 방류되던 처리수를 재이용하기 위한 수지상형관망 네트워크를 설계한다는 가정 하에 최적화 모형을 구축하였다. 제안된 모형에서 관로는 2단계로 건설이 가능하며, 첫 번째 단계에서는 현재 알고 있는 물수요량과 미래에 발생 가능한 불확실한 수요량을 고려하여 최적관로의 건설을 제안하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 건설한 관로가 미래의 물수요량을 모두 충족시키지 못할 경우에 추가로 기존의 관로에 평행하게 건설하는 것을 제안하였다. 첫 번째 단계에서 큰 관로를 매설하여 큰 공사비를 지출하는 것과 첫 번째 관로와 두 번째 관로를 따로 매설하여 공사비 지출을 둘로 나누는 것 사이에 trade-off가 발생하며, 가장 적절한 설계를 2단계 추계학적 선형계획법 (Two-stage stochastic linear programming)에 의해 최적화하였다. 최적의 해는 Branch-and-Cut 알고리즘을 사용하는 GAMS/CPLEX를 사용하여 구하였다.

제안된 모형은 가상의 하수 처리수 재이용 네트워크에 적용하여 그 적용성을 확인하였다. 미래의 물 수요량 불확실성을 고려하여 3가지의 시나리오를 제안하고, 모든 경우에 다 만족시킬 수 있는 공사비의 기댓값을 구하였다. 그 결과 미래의 수요량이 증가할수록 두 번째 단계에서 추가로 건설해야 하는 평행관로의 수가 증가함을 알 수 있었다. 이는 새로운 네트워크 설계 시 기본 자료로 활용될 수 있으며, 건설된 관로가 미래 물 사용량에 따라 다른 설계를 필요로 할 때, 정책결정자에게 매우 유용한 정보가 될 수 있다. 추후 본 논문을 실무에 적용하기 위해 실제 네트워크의 자료와 공사비를 이용하여 보다 실제 적용성을 보이는 것이 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-331-D00489)을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

정건희, 김중훈, 김태웅 (2009). “혼합정수 계획법을 이용한 처리수 재이용 모형의 개발.” **2009년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp.

292-296.

- Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). “Design of optimal water distribution systems.” *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 885-900.
- Bhave, P., and Sonak, V. (1992). “A critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks.” *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 1577-1584.
- Boulos, P., Lansey, K., and Karney, B. (2006). *Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners*. MWHsoft.
- Eusuff, M.M., and Lansey, K.E. (2003). “Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 3, pp. 210 - 225.
- Gupta, I. (1969). “Linear programming analysis of a water supply system.” *Transactions of American Institute of Industrial Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 56-61.
- Gupta, I., and Hassan, M.Z. (1972). “Linear programming analysis of a water supply system with multiple supply points.” *Transactions of American Institute of Industrial Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 200-204.
- Quindry, G.E., Brill, E.D., and Liebman, J.C. (1981). “Optimization of looped water distribution systems.” *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 4, pp. 665-679.
- Samani, H.M. and Mottaghi, A. (2006). “Optimization of water distribution networks using integer linear programming.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 132, No.5, pp. 501-509.
- Savic, D.A., and Walters, G.A. (1997). “Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 2, pp. 67-77.
- Simpson, A., Dandy, G., and Murphy, L. (1994). “Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, No. 4, pp. 423-443.

논문번호: 09-064	접수: 2009.06.08
수정일자: 2009.11.18/12.22	심사완료: 2009.12.22