

수요와 조도계수의 불확실성을 고려한 상수도관망의 최적설계

Optimal Design of Water Distribution System considering the Uncertainties on the Demands and Roughness Coefficients

정동휘* · 정건희** · 김종훈***

Jung, Dong Hwi · Chung, Gunhui · Kim, Joong Hoon

Abstract

The optimal design of water distribution system have started with the least cost design of single objective function using fixed hydraulic variables, eg. fixed water demand and pipe roughness. However, more adequate design is accomplished with considering uncertainties laid on water distribution system such as uncertain future water demands, resulting in successful estimation of real network's behaviors. So, many researchers have suggested a variety of approaches to consider uncertainties in water distribution system using uncertainties quantification methods and the optimal design of multi-objective function is also studied. This paper suggests the new approach of a multi-objective optimization seeking the minimum cost and maximum robustness of the network based on two uncertain variables, nodal demands and pipe roughness uncertainties. Total design procedure consists of two folds: least cost design and final optimal design under uncertainties. The uncertainties of demands and roughness are considered with Latin Hypercube sampling technique with beta probability density functions and multi-objective genetic algorithms (MOGA) is used for the optimization process. The suggested approach is tested in a case study of real network named the New York Tunnels and the applicability of new approach is checked. As the computation time passes, we can check that initial populations, one solution of solutions of multi-objective genetic algorithm, spread to lower right section on the solution space and yield Pareto Optimum solutions building Pareto Front.

Key words : Uncertainty principals; Robustness; Multi-Objective Genetic Algorithms (MOGA); WDS; New York Tunnels

요 지

상수도관망의 최적설계는 단목적함수와 고정된 수리학적 변수로 구성된 비용최소화의 문제로 시작되었다. 하지만, 미래의 불확실한 수요량의 변동과 같이 상수도관망 내에 존재하는 여러 불확실성을 고려하여 설계하는 것이 실제 상수도관망의 거동을 보다 적절히 예측하는 것이다. 따라서 상수도관망 내 존재하는 불확실성을 양적으로 고려하는 다양한 방법이 연구되어 상수도관망의 최적설계에 반영되었고, 다목적함수를 사용한 최적화문제도 다루게 되었다. 본 연구에서는 관망의 절점에서의 수요량과 관의 조도계수를 불확실성을 가진 변수로 두고, 비용 최소화과 관망의 강건성 (Robustness)을 최대화 하는 두 가지 목적함수를 가진 다목적함수 최적화 문제를 다루었다. 최적화 과정은 비용최소화와 불확실성을 고려한 최종 최적화의 두 과정으로 나뉜다. 각 절점에서의 수요량과 관의 조도계수는 베타확률밀도함수 (Beta PDF)를 사용, Latin Hypercube 샘플링 방법으로 불확실성을 고려하였고, 다목적함수의 최적화는 유전자 알고리즘 (Multi-objective Genetic Algorithms, MOGA)을 사용하였다. 제안된 방법은 New York Tunnels이라는 실제 상수도관망에 적용하여 적용성을 검증 하였고 그 결과를 분석하였다. 다목적 최적화 문제에서 최적화가 진행될 수록 초기 값에 모여 있던 점들이 그 점 주위를 시작으로 해 공간에 최적 해를 찾아 오른쪽 아래 부분으로 탐색해 나가는 것을 확인할 수 있었고 최적설계의 해는 해 공간에서 Pareto Front를 구성하며 파레토 최적해를 구하였다.

핵심용어 : 불확실성, 강건성, 다목적 유전자알고리즘(MOGA), 상수도관망, New York Tunnels

1. 서 론

상수도관망은 도시지역의 용수 사용자에게 사용 가능한 수압을 유지하면서 적절한 수질의 충분한 수량을 공급하기 위

한 사회기반 시설이다. 그러므로 상수도관망은 현재 그리고 미래 지역사회에 효율적이고 안전하며, 신뢰도가 높은 용수공급이 가능하도록 설계되어야 한다. 그러나 실제 적용 시에는 새로운 주거단지 조성이나 관망의 누수 등의 상수도관망 특

*고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail : sunny.jung625@korea.ac.kr)

**정회원 · 고려대학교 방재 과학 기술 연구 센터 연구교수

***정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수(교신저자)

성 변화로 인해 지점의 수요량이나 흐름특성에 변화가 야기되고, 상수도관망에 불확실성을 유발하여, 효과적인 운영을 종종 어렵게 한다. 그러므로 불확실한 미래의 수요량, 상수도관망 내 특성의 변화 또는 예산을 계획과 설계 단계에서 반영하여 보다 안정적이고 신뢰도가 높은 설계를 하여야 한다.

초기의 상수도관망 최적설계를 위한 연구는 주로 환경을 결정변수로 하는 선형계획법이나 비선형계획법을 이용한 최소비용문제였다 (Gupta, 1969; Gupta 등, 1972; Alperovits 등, 1977; Quindry 등, 1981; Yates 등, 1984). 그러나 관망시스템의 복잡한 특성으로 인해 유전자 알고리즘 등의 추계학적 탐색기법이 상수도관망의 최적설계에 자주 사용되었다 (Dandy 등, 1993; Simpson 등, 1994). 그러나 보다 근본적으로 상수도관망 내 모든 인자들을 확정론적으로 인식하였던 초기의 연구는 실제 적용에 한계를 드러냈고, 시스템의 불확실성을 고려하여야 한다는 인식이 시작되었다. 상수도관망 설계에 영향을 미치는 매개변수들의 불확실성을 고려하기 위해 불확실성 정도를 정량화 해 고려할 필요가 있다 (Babayan, 2006).

이러한 방법론은 보통 다음과 같이 두 가지 그룹으로 나뉜다. (1) 추계학적 모의 방법을 사용하는 것으로 불확실성을 정량화 하기위해 샘플링에 기반한 방법을 이용하는 것이다. 예를 들어, Lansley 등 (1989)은 처음으로 지점에서의 수두를 주어진 평균과 표준편차의 정규분포를 가지는 변수로 두어 임의성을 고려하는 방법으로 상수도관망의 비용최소화 문제를 다루었다. Lansley의 연구 이후에 확률밀도함수를 이용, 다양한 불확실성 정량화 방법으로 불확실성을 고려하여 상수도관망의 최적설계 연구를 수행하였다. 또한 비용과 관련된 단 목적 함수의 문제 뿐만 아니라 비용최소화와 더불어 네트워크의 신뢰성과 강건성 등을 다루는 다목적함수의 문제도 다루게 되었다. (2) 추계학적 방법을 대신해 결정론적 이론을 이용하여 해석적으로 정량화하는 방법이 있다. 예를 들어 Xu와 Goulter (1998)는 상수도관망의 최적설계를 위해 확률론적 수리모형이 사용된 특별한 접근법을 개발하였는데, 수리모형에서의 불확실성은 First-Order Second-Moment (FOSM)로 알려진 해석적 방법에 의해 정량화되었다. 하지만 이러한 접근법은 불확실성을 가진 변수의 선형관계를 가정함으로써 실제 시스템의 특성을 모의하는데 한계가 있었으며, 계산시간이 매우 긴 단점이 있었다. 이 두 가지 방법 중 일반적으로 불확실성의 정량화 방법으로는 첫 번째 방법인 샘플링에 기반한 방법이 널리 사용되었다.

Babayan 등 (2005)은 Monte Carlo (MC) 방법에 의한 샘플링으로 수요량의 불확실성을 고려하고, 유전자 알고리즘으로 상수도관망의 비용을 최소화하는 방법을 제안하였다. 하지만, 이 방법 또한 샘플링 기법으로 인해 계산시간이 길어 실제 네트워크에 적용하는데 어려움이 있었다. 그러므로 계산시간 단축을 위해 Kapelan 등 (2005)은 상수도관망 내 지점의 수요량과 관의 조도계수의 불확실성을 고려한 다목적함수를 이용한 최적화를 시도하였다. 이는 상수도관망 전체의 비용최소화와 네트워크의 강건성을 최대화하는 두 개의 목적함수를 가진 문제로 구성되었고, 불확실성은 Latin hypercube

(LH, Gregory 등) 방법에 의한 샘플링에 의해 고려되었다. 하지만 샘플링에 이용된 확률밀도함수가 균일분포와 정규분포로 수요량과 조도계수의 양상을 잘 반영해 주었다고 보기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 상수도관망 내 지점 수요량과 관의 조도계수가 불확실성을 가진다는 조건을 고려하여 시스템의 최소비용과 강건성의 최대화를 위한 다목적 함수를 2단계 모의를 통해 최적화하였다. 첫 번째 단계에서는 계산시간을 줄이기 위해 불확실성을 고려하지 않은 확정론적인 비용최소화 최적설계를 시도한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 산출된 확정론적 결과를 초기조건으로 하는 비용최소화와 네트워크의 강건성을 최대화하는 두 가지 목적함수를 가진 상수도관망의 최적화문제를 해결한다. 두 번째 단계에서 고려되는 불확실성은 지점에서의 수요량과 관의 조도 계수이며, 베타함수 (Beta function)을 이용하여 상한치와 하한치 범위를 제한한 후, LH 방법으로 샘플링하여 불확실성을 고려한다. 또한 계산시간 단축을 위해 네트워크의 강건성을 중요절점 (critical node)만을 대상으로 산정 하였다. 제안된 모형은 New York Turnnels 네트워크(University of Exeter, Centre for Water Systems)에 적용하여 그 적용성을 입증하였다.

2. 최소비용설계

본 연구에서는 먼저 불확실성을 고려하지 않은 상태에서 관의 직경을 결정변수로 하고 각 절점에서의 압력이 최소 요구압력보다 높다는 제약조건을 이용하여 최소비용을 결정하는 최적화 모형을 구성하였다. 전형적인 최소비용 설계의 목적함수는 지수승의 형태로 관경(D)과 관의 길이(L)를 독립변수로 가진다. 본 연구에서는 Quindry 등(1981)이 제시한 비용최소화를 위한 목적함수 식을 사용하며, 사용성에 대한 절점의 압력 제한 조건은 상하수도시설기준 (2004)에 제시된 1.53 kgf/cm^2 (수두:15.3 m)을 기준으로 한다.

$$f_1(D) = \min \sum_i^n 1.1 \times D_i^{1.24} \times L_i \quad (1)$$

s.t.

$$H_j \geq 15.3, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

여기서 i 는 관이며 ($i = 1, 2, \dots, n$), j 는 절점 ($j = 1, 2, \dots, m$), D 는 관 i 의 관경 (in), L_i 는 관 i 의 길이 (ft), H_j 는 절점 j 에서의 수두 (m)이다.

위의 확정론적 모형에서 구해진 최적설계치는 불확실성을 고려한 추계학적 최적화 모형에서도 최적해에 근사한 해일 것이라는 가정하에 모형의 초기값으로 사용된다.

3. 불확실성을 고려한 상수도관망의 강건최적화

상수도관망의 설계 시 존재하는 다양한 불확실성의 요인 중 지점의 수요량과 관의 조도계수가 알려진 가장 중요한 인자이다. 수요량은 인문 사회적 변화와 같은 외부적인 요인에 의해 변화하며, 그 변동성 또한 크다. 관의 조도 계수 또한 관

의 물리적인 특성과 외부 환경에 따라 그 값이 크게 변화한다. 그러므로 대표적인 두 가지의 불확실성 요인을 고려하여 상수도관망을 설계 하려는 시도가 있었다(Kapelan 등, 2005).

본 연구에서도 절점에서의 수요량과 관의 조도계수를 불확실성을 가진 변수로 가정하였고 목적함수 또한 확정론적 모형과는 달리 두 가지의 목적함수를 동시에 만족시키도록 모형을 구성하였다. 목적함수는 비용 최소화와 상수도관망의 강건성(Robustness)의 최대화에 대한 것이었다. 여기서 강건성은 주로 불확실성 모델을 구축할 때 외란에 민감하지 않은 성질을 나타내는 것으로 항공기 등의 최적 설계에 자주 사용되는 용어이다 (김주현, 2008). 비용을 최소화하기 위해서는 가능한 관경이 작은 관을 사용하여 상수도관망을 설계하는 것이 좋으나, 이는 수요와 조도계수의 불확실성 때문에 예상한 것보다 많은 수요가 발생하거나 조도계수가 변하여 관내 유속이 달라지는 경우에는 적합한 압력조건을 만족시키지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 그러므로 상수도관망의 공사비를 최소화 하면서도 강건성을 최대화하는 설계가 보다 바람직한 설계라고 할 수 있다.

3.1 지점 수요량과 관 마찰계수의 불확실성

본 연구에서는 지점의 수요량과 관의 조도계수가 베타확률 밀도함수 (Beta PDF)를 가지는 불확실성이 존재하는 자료라고 가정하였다. 여기서 베타분포(Beta distribution)은 구간 (0,1)상의 연속형 확률변수의 분포를 표현하는데 사용될 수 있으며, 베타분포의 모수 a, b의 값에 따라 구간 (0, 1)상에 여러 가지 분포형태를 나타낼 수 있다. 따라서 베타분포는 임의의 유한구간(finite interval) 내의 값을 갖는 변수에 대한 확률모형을 제공한다. 베타함수는 다음과 같다.

$$B(a, b) = \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx \quad (3)$$

여기서, x는 확률변수이며, a, b는 모수이다.

베타확률변수 x의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x;a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad (0 < x < 1) \quad (4)$$

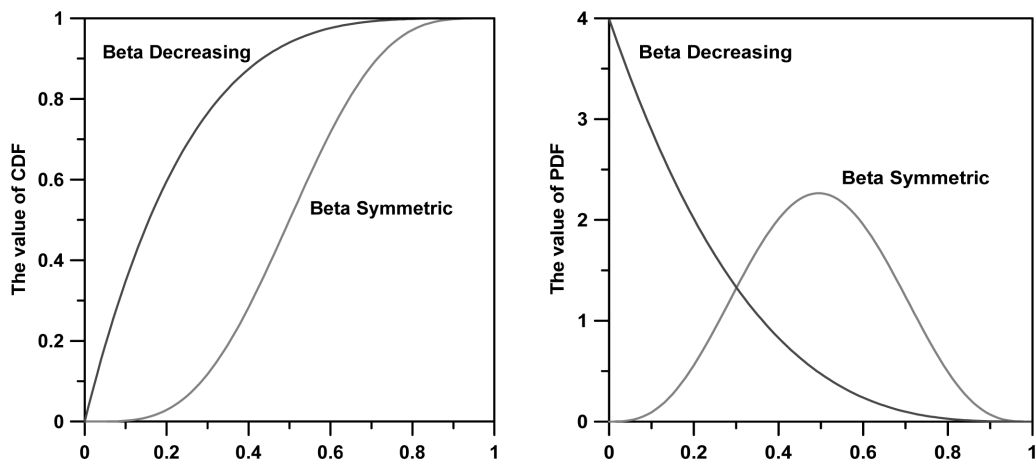


그림 1. PDFs and CDFs of Beta Symmetric and Beta Decreasing

지점에서의 수요량과 관의 조도계수의 불확실성을 반영하기 위해 확률밀도함수를 이용한 샘플링 방법은 이전부터 널리 사용되어 왔다. 하지만 이전까지 흔히 사용해 왔던 정규 분포 또는 균일분포를 사용한 추정 은 확률밀도함수의 범위가 $-\infty$ 에서 ∞ 로 현실에서는 거의 일어나기 힘든 각 자료들의 극치값이 선택될 수 있어 모형의 경제적인 설계를 저해하는 요인으로 작용하기도 하였다. 따라서 본 연구에서는 베타분포를 이용하여 수요량과 조도계수의 발현 가능 구간을 유한하게 지정, 합리적인 구간의 값을 사용 할 수 있도록 하였다. 또한 모수 a, b의 변환으로 지점에서의 수요량과 관의 조도계수의 변화 양상에 적합한 분포형을 획득할 수 있도록 하였다. 예를 들어, 지점에서의 수요량은 일정 수치를 기준으로 실제 재현값이 산포되어 있는 반면, 관의 조도계수는 관의 매설이 후 일정하게 감소한다. 그러므로 상한값과 하한값의 범위를 설정할 수 있는 베타함수를 이용하여 지점에서의 수요량과 관의 조도계수의 양상의 모의하고 현실적인 재현 범위를 제공하였다.

본 연구에서는 두 가지 형태의 베타분포의 확률밀도함수를 사용하였다. (1) 지점에서의 수요량 샘플링을 위해서 수요량에 대한 베타 확률 밀도함수는 모수 a, b를 모두 4.27로 두었다. 모수가 이와 같을때 베타 확률 밀도 함수는 확률변수의 구간 (0, 1)에서 x=0.5일때 2.26의 값을 가지며 이를 기준으로 좌우 대칭이다. (2) 관의 조도계수는 모수를 각각 a=1, b=4.06으로 두어 확률변수 구간 (0, 1)에서 x=0일때 4의 값을 가지며 감소하는 형태의 확률 밀도함수를 사용하였다. 편의상 (1)의 베타 확률밀도함수를 베타 대칭분포(Beta Symmetric)라 하며, (2)은 베타 감소분포(Beta Decreasing)라 하겠다.

일단 베타 확률밀도함수가 결정되고 나면 누적확률밀도 함수로부터 Latin hypercube (LH) 샘플링 과정이 필요하다. LH 샘플링 방법은 확률밀도함수로부터 동일한 확률로 고려한 n개의 중복되지 않은 구간으로 나누어 각 구간에서 n개의 다른 값을 추출해 낸다. 또한 LH 샘플링 방법으로 샘플링할 때 미리 구성된 시나리오에 의해 어느 구간에서 값을 추출해 낼 것인지를 결정한다. LH방법의 사용으로 MC방법보다 적은 횟수의 샘플링으로 충분한 개수의 변수를 얻을 수 있어

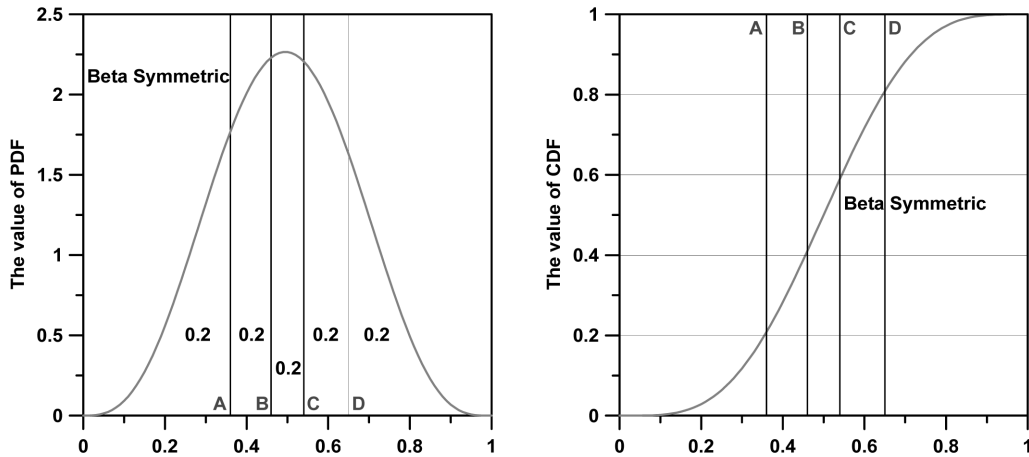


그림 2. An Example of LH Sampling based on 20% Equal Probability

계산시간을 효율적으로 줄일 수 있다. 예를 들어 그림 2에서 MC방법으로 샘플링을 할 경우 평균값 주위의 값들이 추출될 확률이 높고 따라서 비정상적인 상태의 값을 고려해 주기 위해서는 많은 샘플링이 수반된다.

하지만 LH 방법의 경우, 누적확률밀도함수의 동일 확률구간을 나누어 그림 2에 나타나 있는 A, B, C, D선으로 나누는 구간을 구성한다. 이후 시나리오를 통해 A, B, C, D로 나누는 구간에서 순차적으로 샘플링을 진행하여 보다 적은 샘플링 횟수에서도 다양하게 불확실한 상황의 모의가 가능하게 된다. LH 샘플링 과정을 실행하고 난 후 추출된 값은 다음 식 (5)와 (6)에 의해 불확실성을 가진 수요량과 관의 조도계수로 변환된다. 먼저, 불확실성을 가진 지점에서의 수요량은 $Qunc_j$ 는 다음 식 (5)에 의해 구해진다.

$$Qunc_j = Q_j + Q_j \{x \times B(a,b) - 0.5\} \in [Q_j - (Q_j \times 0.5); Q_j + (Q_j \times 0.5)] \quad (5)$$

여기서, j 는 절점($j=1, 2, \dots, m$)이며, $Qunc_j$ 는 절점 j 에서의 불확실성을 가진 수요량, Q_j 는 기본 수요량, x 는 샘플링된 확률 변수, $B(a, b)$ 는 샘플링된 확률밀도 값이다.

같은 방법으로, 불확실성을 가진 관의 조도계수 $Cunc_i$ 도 추출되어 다음 식 (6)에 의해 변환된다.

$$Cunc_i = C_i + C_i \{x \times B(a,b)\} \in [C_i; C_i + C_i \times 1] \quad (6)$$

여기서, i 는 관($i=1, 2, \dots, n$)이며, $Cunc_i$ 는 관 i 에서 불확실성을 가진 관의 조도계수, C_i 는 기본 조도계수이다. 변환된 지점의 수요량과 관의 조도계수는 모의시 네트워크의 각 절점과 관에 반영되어 해석된다.

3.2 강건성 산정

불확실성을 가진 지점에서의 수요량과 관의 조도계수의 샘플링은 미리 구성된 시나리오를 기반으로 수행된다. 시나리오 모의의 결과 네트워크의 수리학적 상태는 변화하며 따라서 각 절점에서의 압력수두도 변화하게 되어 용수의 사용성에 영향을 주게 된다. 어떠한 절점에서의 압력의 변화정도는 현재의 관의 조합으로 이루어진 네트워크가 변동에 취약한지

아닌지를 말해준다. 즉, 상수도관망의 강건성(Robustness)은 상수도관망의 설계 시 변동성 및 불확실성을 가진 변수의 변화에 따라 전체 상수도관망이 이를 견딜 수 있는 정도를 수치화한 척도라 할 수 있다. 따라서 시나리오에 의한 압력변화의 변동 폭이 클수록 그 네트워크는 변화에 취약하고, 변동폭이 작을수록 강건한 네트워크가 된다.

관망의 강건성을 산정하기 위한 도입된 매개변수는 다음 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\alpha = \frac{Havg_c - 15.3}{\sigma_c} \quad (7)$$

여기서, $Havg_c$ 는 중요절점에서의 다양한 수요량과 조도계수 값에 의한 압력수두 변화의 평균이며, σ_c 는 중요절점에서 압력수두 변화의 표준편차이다. 매개변수 α 는 추계학적인 값인 절점의 압력수두가 최소 사용성을 보장하기 위한 제한조건 15.3 kgf/cm^2 (수두 : 15.3 m) 보다 얼마나 자주 큰 값을 가지는지와 관련이 되어있다. 예를 들어 α 가 1.282일때 네트워크의 강건성이 90%이며, α 가 1일때는 68%, α 가 -1.282일때 10%이다. 즉, 더 큰 α 를 가지면 그 네트워크는 더 큰 강건성을 가진다. 따라서 제안된 접근법의 목적은 최대의 α 값을 구하는 데 있다.

모든 지점에서의 시나리오별 압력수두를 계산하여 비교하 기관 번거로운 작업이므로 네트워크의 강건성을 추정하기 전에 중요절점 (critical node)의 선정이 선행된다. 중요절점은 관망 내 모든 절점 중에서 변동성에 가장 취약한 절점으로 선택되며, 이는 가장 낮은 α 를 가지는 절점을 말한다.

비용최소화 설계의 단일 목적함수와 함께 본 연구에서 제안된 다목적함수는 강건성 최대화의 문제 또한 다루며 강건성 최대화를 담은 목적함수는 다음의 식 (8)와 같다.

$$f_2(D) = \max \alpha \quad (8)$$

s.t.

$$H_j \geq 15.3, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

마지막으로, 식을 간소화하기 위해 위의 식은 절점에서의 수요량에 대해서만 나타낸 것임을 밝힌다. 그러나, 앞서 밝힌

대로 사례연구에서는 관의 조도계수 또한 위의 같은 과정을 거쳐 절점에서의 압력수두를 계산하고 매개변수 α 를 계산하는데 반영된다.

3.3 다목적 함수를 이용한 최적화

비용을 최소화하고 네트워크의 강건성을 최대화하는 제시된 다목적함수의 최적화 방법은 두 단계로 구성된다. (1) 첫 번째 단계는 관망 내의 환경의 조합이 최소 비용을 산출하도록 하는 비용최소화 최적화 설계 단계이다. 이 단계에서는 앞서 진행된 연구들과 마찬가지로 유전자 알고리즘으로 구성된 단 목적함수를 다룬다. 단 목적 함수에서의 해는 해공간에서의 전역 해에 효율적으로 수렴하고 계산시간을 줄이기 위해 다음 단계인 다목적 함수의 최적화의 초기조건이 된다. (2) 두 번째 단계는 절점에서의 수요량과 관의 조도계수를 불확실성을 지닌 변수로 고려하여 비용 최소화와 강건성의 최대화 문제를 다루는 다목적함수로 구성된다. 다목적 유전자 알고리즘은 (1)번의 해로부터 시작하여 해공간에서 해를 탐색하여 최소비용과 강건성 평가를 위한 매개변수 α 의 최대값 사이에서 Pareto Front를 구성한다.

최적화를 위한 다목적 유전자 알고리즘은 30개의 인구수로 구성되어 있고 각 인구의 gene은 사용 가능한 환경 중에서 선택된 실제 환경으로 구성되어 있다. 재생산 방법은 순위에 의한 선택을 하였고, 교차 방법은 다점 교차로 85%의 교차 비율로 돌연변이 비율은 5%로 구성되었다.

다목적함수의 최적화 문제는 그 해를 해공간에서 파레토 프론트 위에 나타낸다. 파레토 프론트를 찾는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서 사용된 방법은 Fonseca & Fleming-ranking approach (Fonseca 등, 1993)이다. 이 방법은 두 개의 목적함수를 가진 최적화 문제에 있어 먼저 모든 인구를 x 축과 y 축으로 구성된 해공간 위에 그 값에 따라 위치시키며, 위치에 따른 각 인구의 순위를 매김으로써 최적화를 시작한다. 각 인구의 순위를 구하는 공식은 다음 식 (10)과 같다.

$$Rank(i) \text{ of the } i^{th} \text{ population} = \text{the Number of Inner Points} + 1 \quad (10)$$

i 번째 인구의 순위는 해공간에서의 x 축과 y 축에 해당하는 값에 따라 자신의 위치를 나타내고, 즉 두 개의 목적함수의 값에 따라 해공간 위에서의 위치를 지정한 뒤, 두 목적함수 값에 있어 얼마나 많은 점들이 자기 자신을 지배하느냐를 계산하는 것에 의해 결정된다. 예를 들어, 본 논문에서는 각 관 조합이 가지는 비용과 매개변수 α 에 따라 다음 그림 3과 같은 2차원 평면상에 각 인구의 위치를 나타낸 후 식 (10)에 의해 순위를 결정한다. 다목적 유전자 알고리즘에서 재생산은 위의 과정에서 정해진 순위에 의해 높은 순위의 인구가 선택될 확률이 높도록 구성하였다. 본 연구에서 보다 쉬운 해공간과 파레토 프론트의 이해를 위해 y 축을 α 로 두는 대신 $-\alpha$ 로 두어 위치시킨 점의 왼쪽 아래에 다른 점이 존재할 경우, 그 점은 지배당한 것으로 본다. 식 (10)에서 언급된

수요와 조도계수의 불확실성을 고려한 상수도관망의 최적설계

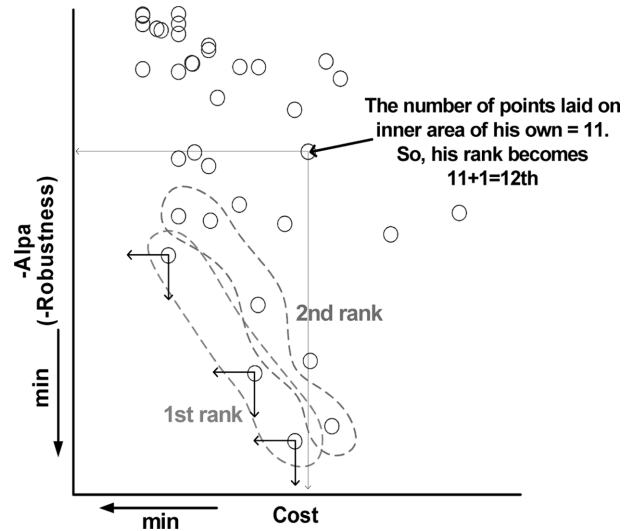


그림 3. The Method of Ranking by Fonseca & Fleming-Ranking Approach

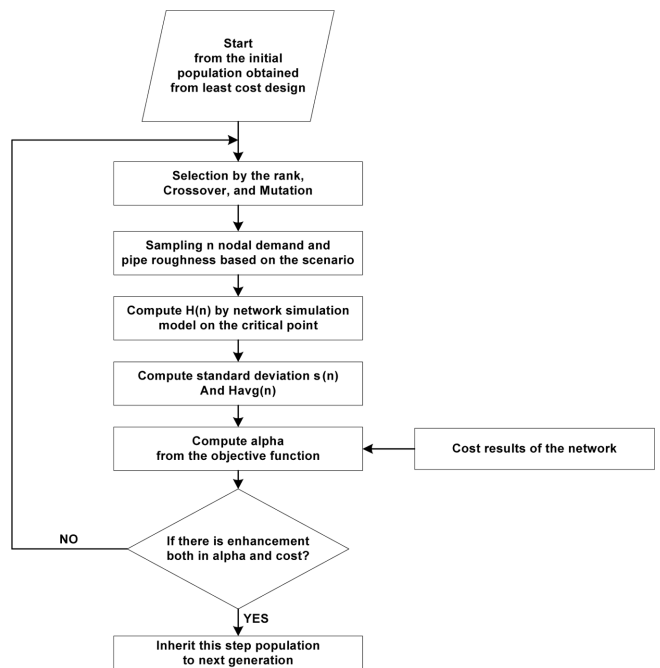


그림 4. Least Cost and Robustness Optimization Procedure

“Inner points”란 기준 점이 위치한 왼쪽 아래 공간에 존재하는 점들을 말하는 것으로 이 점들은 기준이 되는 점보다 적은 비용과 높은 네트워크의 강건성을 가지는 환경의 조합이다.

따라서 파레토 프론트를 구한다는 것은 자신보다 더 적은 비용과 더 높은 강건성을 가지는 점들이 없는 점을 구해나가는 것이다. 즉, 비 지배 해 또는 비 지배 점을 구하는 것이다. 비용이 적을수록 환경이 작아지고 따라서 네트워크의 강건성은 떨어지며, 비용을 많이 들여 환경을 늘일수록 네트워크의 강건성은 높아지므로 그림 3과 같은 해공간에서 파레토 프론트는 비용과 $-\alpha$ 가 반비례하는 일련의 선을 이루게 된다.

이에 따라, 다목적 유전자 알고리즘의 정지조건은 인구수

30개가 모두가 Pareto Front 위에 위치하는 경우로 모든 인구의 순위가 1위가 되어 그 값이 1000번의 계산 이후에도 변화가 없을 때로 설정이 되었다.

4. 실제 네트워크에의 적용

불확실성을 고려한 다목적 함수 최적화 설계의 새로운 접근법을 적용한 사례연구 네트워크는 New York tunnels로 19개의 절점과 1개의 저수지, 21개의 관으로 구성되어 있다. 수리학적 값의 계산과 유전자 알고리즘을 이용한 최적화는 Visual Basic 과 US Environmental Protection Agency에서 개발한 상수도관망 프로그램인 EPANET을 연동하여 실행하였다. 이 과정에서 손실 수두의 계산은 Hagen-Williams 공식을 이용하였으며, 네트워크 내 관은 Hazen-Williams C계수가 100인 주철관이다.

관의 선택은 다음 표 1의 7가지의 선택 가능한 관경 중에서 이루어졌다.

첫 번째 단계의 설계 즉, 비용최소화 설계에서 관 내 유속은 침전물의 침전 방지를 위해 상하수도시설기준 (2004)에 따라 4.8 m/s이하로 제한되었고, 용수의 절점에서의 압력에 대한 제한 조건으로 각 절점에서의 압력이 1.53 kgf/cm²(수두

: 15.3 m)보다 커야한다는 제한조건이 설정되었다. 이 제한조건은 두 번째 단계의 설계 즉, 불확실성을 고려한 다목적 함수의 최적화 문제에 있어서도 동일하게 적용되었다. 네트워크의 강건성을 산정하기 위해 도입된 매개변수는 중요절점에서 계산된다. 1000번의 시나리오에 의한 계산 결과에서 네트워크 내 19개의 절점의 값을 산정을 하여, 가장 낮은 값을 가지는 절점을 중요절점으로 선택하였다. 그 결과, 변화에 가장 취약한 절점인 절점 18번으로 선정되었다.

5. 결과 및 토의

5.1 최소비용설계

상수도관망의 비용 최적화 문제에 있어서는 다목적 최적화 문제와는 다르게 관의 매설과 관 자체의 비용을 최소화할 수 있는 오직 하나의 해가 존재한다.

1000번 정도의 계산을 거쳐 최적화된 관경을 얻었고, 관 18, 19의 관경이 증가한 관을 제외하고는 거의 모든 관에서 관경의 감소를 확인 할 수 있었다. 원래의 관망을 구성하는 모든 관의 관경과 길이에 의한 총 비용은 2.228×10¹¹원에서 비용 최소화한 비용 1.412×10¹¹원으로, 사용성에 대한 제한 조건을 만족시키며 8.157×10¹¹원을 절감하는 결과를 낳았다.

표 1. The Selectable Diameters in New York Tunnels Network

Available pipe sizes (m)	1.524, 1.829, 2.591, 3.353, 3.962, 4.572, 5.182
--------------------------	---

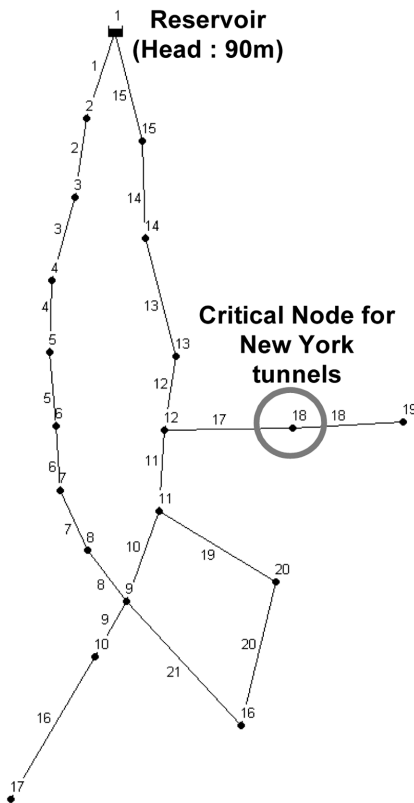


그림 5. Layout of the Pipe Network for New York Tunnels (University of Exeter, Centre for Water Systems)

표 2. The Comparison between Diameters of the Original Constitution and those of the Optimized One

Pipe ID	Length (m)	Original Diameter (m)	Optimized Diameter (m)	Diameter Decrease (m)
Pipe 1	3480	4.572	2.591	1.981
Pipe 2	5940	4.572	1.829	2.743
Pipe 3	2190	4.572	1.829	2.743
Pipe 4	2490	4.572	1.829	2.743
Pipe 5	2580	4.572	1.829	2.743
Pipe 6	5730	4.572	1.524	3.048
Pipe 7	2880	3.353	1.524	1.524
Pipe 8	3750	3.353	1.524	1.829
Pipe 9	2880	4.572	1.524	3.048
Pipe 10	3360	5.182	2.591	2.591
Pipe 11	4350	5.182	3.353	1.829
Pipe 12	3660	5.182	3.962	1.219
Pipe 13	7230	5.182	4.572	0.610
Pipe 14	6330	5.182	4.572	0.610
Pipe 15	4650	5.182	4.572	0.610
Pipe 16	7920	1.829	1.524	0.305
Pipe 17	9360	1.829	1.829	0
Pipe 18	7200	1.524	1.829	-0.305
Pipe 19	4320	1.524	1.829	-0.305
Pipe 20	11520	1.524	1.524	0
Pipe 21	7920	1.829	1.524	0.305
Total Cost (원)	-	2.228×10 ¹¹	1.412×10 ¹¹	8.157×10 ¹¹

5.2 불확실성을 고려한 상수도관망의 최적설계

불확실성을 고려하며 비용최소화와 강건성을 최대화한 상수도관망의 최적설계에서 비용은 최소 1.412×10^{11} 원에서 최대 1.883×10^{11} 원의 범위를 가졌다. 이것은 New York Tunnels의 상수도관망은 최대의 강건성을 가지기 위해 133%의 비용을 더 들여야 한다는 것을 의미한다. 비용을 133% 증가시키면 강건성의 측정을 위해 도입한 매개변수 α 는 최소 비용일 때 1.744에서 17.939로 증가하였다. 즉, 최대의 강건성을 가진 관의 조합은 최소비용으로 설계된 경우보다 10.29배의 강건성을 가진다. New York Tunnels에서 1.33배의 비용을 들임으로 인해서 10.29배의 더 강건한 네트워크를 구성할 수 있었다.

이와 같은 결과는 상수도관망 설계자에게 의미있는 정보를 제공한다. 비용과 네트워크의 신뢰성 또는 강건성 사이에서 설계자가 설계에 보다 더 큰 비중치를 두어 반영하고자 하는 가치에 따라 선택가능한 해 중에서 취사선택하여 반영할 수 있다. 예를 들어, 만약 설계자가 미래의 실현가능한 상수도관망의 상태를 충분히 고려한 설계를 하고 싶다면 강건성이 높은 해를 선택하면 되고, 비용이 더 민감한 문제라면 비용을 최소화한 관의 조합을 선택하여 설계에 반영하면 되는 것이다. 본 연구의 결과는 수요와 조도계수의 불확실성을 고려한 상태에서 상수도관망의 비용과 강건성의 상쇄효과(trade off)를 가진 선택 안을 제시한다. 최소비용의 해와 최대 강건성의 해 각각에서 관경의 변화는 다음 표 3과 같다.

표 3에서 볼 수 있듯이 최대 강건성을 가지는 관망을 구성하기 위해서 첫 번째 단계에서 얻은 최소비용의 해에서 전체 21개 관 중 7개의 관의 크기가 변경되었다. 총 5개의 관이 최대 강건성을 얻기 위해 확장이 되었고, 1개의 관이 관경이 감소되었다. 자세히 살펴보면, 관경이 확장된 관 중, 관 1, 3, 13에서는 관 4, 17에 비해 적은 관경의 변화가 있었고 관 4, 17에서는 매우 큰 관경의 크기 증가가 있었는데, 이것은 New York Tunnels 관망 구성 자체의 특성에 기인한 것이다. 즉, 관 4, 7번이 크게 증가했을 때 다른 관들의 큰 크기 증가 없이 강건성의 최대화를 얻는 것이다.

상수도관망의 비용최소화와 강건성 최대화의 두 가지 목적 함수를 가진 다목적 최적화문제의 해로 그림 6와 같은 파레토 해집합을 얻었다. Fonseca & Fleming-ranking approach에의 한 비지배해의 명확한 확인과 이해를 돕기 위해 y 축을 α 대신 $-\alpha$ 로 바꾸었다. 따라서, 어떠한 해가 비용이 작고 강건성이 클수록 해공간에서 왼쪽 아래에 위치하게 된다. 30개의 인구수로 최적화문제를 다루어 계단 형태의 Pareto Front를 구성하였고, 비용이 어느 수치를 넘어 가면 강건성에 단계적 증가가 발생하였다. 그 결과 해는 비슷한 강건성 수준을 가지는 4개의 소그룹으로 나뉘어졌다. 결과의 보다 정확한 분석을 위해서 유전자 알고리즘 구성 시 30개 보다 더 많은 인구수를 가지고 최적화를 시켜 각 그룹사이의 빈 공간에 어떤 해가 존재하는지 확인을 위해 또한 보다 더 조밀한 Pareto Front를 구성할 필요가 있다.

첫 번째 단계의 단 목적 비용최소화 문제의 해를 초기조건으로 사용하는 효용성에 대한 확인을 해보기 위해, 초기조건

표 3. The Comparison between Diameters of the Best Robust Solution and Deterministic Solution

Pipe ID	Least Cost solution (m)	Robust Solution (m)	Diameter Increase (m)
Pipe 1	2.591	3.962	1.372
Pipe 2	1.829	1.829	0
Pipe 3	1.829	3.353	1.524
Pipe 4	1.829	5.182	3.353
Pipe 5	1.829	1.524	-0.305
Pipe 6	1.524	1.524	0
Pipe 7	1.524	1.524	0
Pipe 8	1.524	1.524	0
Pipe 9	1.524	1.524	0
Pipe 10	2.591	2.591	0
Pipe 11	3.353	3.353	0
Pipe 12	3.962	3.962	0
Pipe 13	4.572	5.182	0.610
Pipe 14	4.572	4.572	0
Pipe 15	4.572	4.572	0
Pipe 16	1.524	1.524	0
Pipe 17	1.829	5.182	3.353
Pipe 18	1.829	3.962	2.134
Pipe 19	1.829	1.829	0
Pipe 20	1.524	1.524	0
Pipe 21	1.524	1.524	0
Total Cost (원)	1.412×10^{11}	1.883×10^{11}	4.719×10^{11}
Robustness (α_c)	1.744	17.939	16.195

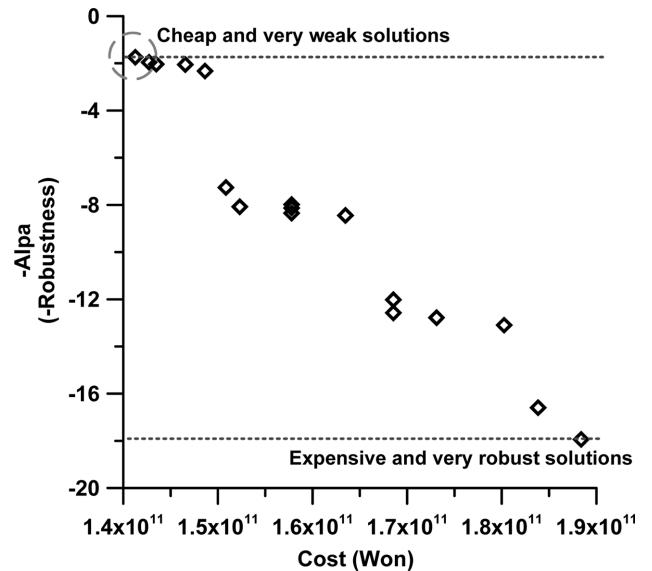


그림 6. The Robust Pareto Front (Dotted Line) and the Initial Populations from Least Cost Design (Circled with Red)

으로 입력된 값들을 붉은 색 원으로 표시하였다. $-\alpha$ 가 최대가 되는 해, 즉 가장 낮은 강건성을 가지는 해는 가장 저렴한 비용의 강건성이 낮은 해이고 이는 첫 번째 단계의 비용

최소화 문제의 해이다. 1.486×10^{11} 원의 비용을 가지는 해까지 초기조건으로부터 그려진 일련의 선을 따라 구성되고 있는 것으로 보아 초기조건의 이용은 효율적인 접근방법임을 알 수 있다. 또한 다목적 최적화 문제에서 최적화가 진행될 수록 초기조건에 모여 있던 점들이 그 점 주위를 시작으로 해 공간에 최적 해를 찾아 오른쪽 아래 부분으로 탐색해 나가는 것을 확인할 수 있었으며 이 또한 초기조건 이용의 장점을 설명해 준다.

6. 결 론

본 연구는 불확실성을 고려하며 비용최소화와 네트워크의 강건성을 최대화하는 두 개의 목적함수로 구성된 상수도관망의 최적설계에 대한 보다 발전된 접근법을 제시하였다. 네트워크의 강건성과 상수도관망의 불확실한 상태의 변화를 반영하기 위해 샘플링 방법이 사용되었고, 샘플링은 구성된 시나리오를 바탕으로 진행되었다. 두 개의 불확실성을 가진 변수인 절점에서의 수요량과 관의 조도계수는 범위가 일정하게 주어지는 베타확률밀도함수에서 샘플링 되어 일정한 수치를 기준으로 산포되어 있는 지점 수요량의 특성과 매설 이후 일정하게 감소하는 관의 조도계수 각각의 특성을 적절히 모의하였다. 샘플링 방법으로는 MC 방법의 대안으로 개발되었던 LH 샘플링 방법이 사용되어 보다 적은 샘플링 횟수로 보다 더 다양한 상수도관망 내 특성 변화를 모의할 수 있었고, 기존의 샘플링 방법에 비해 모의의 효율성을 증진 시켰다.

비용최소화와 강건성의 최대화 문제는 알고리즘 자체의 특별한 향상 없이 다목적 유전자 알고리즘을 사용하였다. 하지만 제안된 접근법의 혁신적인 측면은 최적설계의 단계가 두 단계로 나뉘어 보다 효율적인 설계방법을 제공한다는 것이다. 최적설계의 문제는 먼저 압력수두와 유속에 대한 제한조건을 가진 상수도관망 비용최소화의 단 목적 함수로 해를 구하여 그 결과를 초기조건으로 최적해의 파레토 최적해를 찾는 상수도관망의 비용최소화와 강건성의 최대화의 다목적 함수의 문제로 접근하였다. 두 번째 단계에서는 본 연구의 목적과 같이 불확실성을 고려한 상태에서 두 목적함수를 최적화하였다.

향후 30개 보다 더 많은 인구수를 이용한 최적화를 통해 더 조밀한 파레토 프론트를 구할 수 있으며 이때 더 많은 가능해를 제공할 것이다. 마지막으로, 다양한 시나리오 구성 방법에 대한 연구로 더 현실적인 상수도관망의 모의를 실현할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 (재)동부문화재단의 BK21건설산업글로벌리더양성사업단 산업체대응자금지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

김주현, 김병곤, 전상욱, 전용희, 이동호 (2008) 신경망으로 구축된 불확실성 모델을 이용한 전투기 날개의 강건 최적 설계, **한국항공우주학회지**, 제36권, 제2호, pp. 99-104.

상수도 시설 기준 (2004) **한국상하수도협회**

Alperovits, E. and Shamir, U. (1977) *Design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research, Vol. 13, No. 6, pp. 885-900.

Babayan, A.V., Kapelan, Z., Savic, D.A., and Walters, G.A. (2005) *Least cost design of robust water distribution networks under demand uncertainty*. J. Water Resour. Plann. Manage., Vol. 131, No. 5, pp. 375-382.

Babayan, A.V., Kapelan, Z., Savic, D.A., and Walters, G.A. (2006) *Comparison of two methods for the stochastic least cost design of water distribution systems*. Engineering Optimization, Vol. 38, No. 3, pp. 281-297.

Dandy, G.C., Simpson, A.R., and Murphy, L.J. (1993) *A review of pipe network optimisation techniques*. in Proc. WATERCOMP, Melbourne, Australia, pp. 373-383.

Fonseca, C.M. and Fleming, P.J. (1993) *Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization*. Proc., 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms, S. Forrest, ed, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 416-423.

Gregory D.W. and Kelly H.J. (1998) *A User's Guide to LHS: Sandia's Latin Hypercube Sampling Software*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM., SAND98-0210

Gupta, I. (1969) *Linear Programming Analysis of a Water Supply System*. IIE Transactions, Vol. 1, No. 1, pp. 56-61.

Gupta, I., Hassan M.Z., and Cook J. (1972) *Linear Programming Analysis of a Water Supply System with Multiple Supply Points*. IIE Transactions, Vol. 4, No. 3, pp. 200-204.

Kapelan, Z.S., Savic, D.A., and Walters, G.A. (2005) *Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty*. Water Resour. Res., Vol. 41, No. 11, W11407-11407-15.

Lansley, K.E., Ning Duan, Mays, L.W., and Yeou-Kung, T. (1989) *Water distribution system design under uncertainties*. J. Water Resour. Plann. Manage., Vol. 115, No. 5, pp. 630-645.

Quindry, G., Brill, E.D., and Liebman, J.C. (1981) *Optimisation of Looped Water Distribution Systems*. J. Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 107, pp 665-679.

Simpson, A.R., Dandy, G.C., and Murphy, L.J. (1994) *Genetical algorithm compared to other techniques for pipe optimisation*. J. Water Resour. Plann. Manage., Vol. 120, No. 4, pp. 1589-1603.

Xu, C. and Goulter, I.C. (1999) *Reliability-based optimal design of water distribution network*. J. Water Resour. Plann. Manage., Vol. 125, No. 6, pp. 352-362.

Yates, D.F., Templeman, A.B., and Boffey, T.B. (1984) *The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks*. Engineering Optimization, Vol. 7, No. 2, pp. 142-155.

◎ 논문접수일 : 09년 12월 22일
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 12월 23일
 ◎ 심사완료일 : 10년 01월 07일