

## 상수관망 최적 생애주기 설계를 위한 유전알고리즘의 적용

이승엽<sup>1</sup>, 유도근<sup>1</sup>, 정동휘<sup>1</sup>, 김종훈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 방재과학기술연구소

<sup>2</sup>고려대학교 건축사회환경공학부

## Optimal Life Cycle design of Water Pipe System using Genetic Algorithm

Lee, Seungyub<sup>1</sup>, Yoo, Do Guen<sup>1</sup>, Jung, Donghwi<sup>1</sup>, Kim, Joong Hoon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University,

<sup>2</sup>School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University,

**요약** 상수관망은 중요 사회기반 시설물 중 하나로, 상수관망을 구성하는 수 많은 관을 통해 각 수요지로 물을 공급 및 배분하는 역할을 한다. 수 많은 관들로 구성된 상수관망의 설계는 여러 수리학적 조건을 고려하여 진행되기에 그리 간단한 문제는 아니다. 이에 많은 연구자들이 최적화 기법을 도입하여 상수관망의 설계에 사용을 하고 있다. 본 연구에서는 생애주기 에너지 분석을 통한 최적 관경을 결정하기 위한 모형을 개발하였다. 개발한 모형은 최적 설계를 위해 유전자 알고리즘을 도입하였고, 수리해석을 위해 EPANET2.0을 연동하고 생애주기 동안에 관의 변화를 모의하기 위한 노후도식과 관 파손확률 공식을 적용하였다. 모형은 총 두 곳의 샘플 관망에 적용하였으며, 두 관망에 대한 에너지 기반 최적 설계를 진행하였다. 에너지 최적 관경 조합에 대한 비용을 계산하여 비용 최적 관경 조합과 비교를 하였으며, 이를 통해 에너지 기반 최적 설계가 비용 측면에서도 큰 불이익이 없이 진행될 수 있음을 보였다.

**Abstract** In this study, a model is developed based on Life Cycle Energy Analysis (LCEA) method with Genetic Algorithm (GA) to determine optimal diameter of Water Distribution System (WDS). For hydraulic analysis the EPANET2.0 program is linked with developed model, pipe-aging equation and pipe-breakage equation are built in to developed model to simulate pipe change through life cycle. The model is then applied to two sample WDSs for optimal energy design. After determining optimal diameter for each WDS, the total cost is calculated based on determined diameter and compared with well-known optimal diameter set of each WDS. Results show that optimal energy design of WDSs through the developed model can be an alternative option for optimal design of WDSs for reducing energy with lower in cost.

**Key Words** : EPANET2.0, Genetic Algorithm, Life Cycle Energy Analysis, Optimal design, Water distribution system

### 1. 서론

현재 우리 사회에서 사용되는 대부분의 물은 상수관망을 통해 공급되고 있다. 가정에서는 생활용수를, 공장에서는 공업용수, 그리고 농장에서는 농업용수를 상수관망에서 공급 받아 운영하고 유지한다. 뿐만 아니라 화재

와 같은 인명이 걸린 재해 시에도 비상 용수를 공급해 많은 인명을 구할 수 있다. 이와 같이 상수관망은 우리 사회를 유지하는 중추적인 역할을 하는 시설물이다. 그렇기에 설계 단계에서부터 상수관망의 철거 단계에 이르기 까지, 실제 운영 단계에서 그 기능을 잃지 않고 유지하는 것은 매우 중요한 과제라고 할 수 있다.

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.  
(NRF-2013R1A2A1A01013886).

\*Corresponding Author : Joong Hoon Kim (Korea Univ.)

Tel: +82-2-3290-3316 email: jaykim@korea.ac.kr

Received February 12, 2015

Revised (1st March 23, 2015, 2nd April 14, 2015)

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

상수관망의 설계 시 설계자는 관의 관경, 길이부터 펌프 위치 및 용량, 밸브의 위치 등 여러 요소들의 제원을 결정한다. 이 때 물을 공급원에서 각 수요절점으로 공급 및 배분하기 위해서는 각 수요 절점에서 수압, 관내 유속과 같은 수리 조건을 만족해야 한다. 이러한 수리 조건은 관이 물을 공급 및 배분하는 과정에서 관내에 이물질 혹은 연경질의 스케일, 녹 등이 쌓이면서 노후되거나, 심한 경우 파손되어 상수관망의 운영 단계의 어느 시점에서 만족하지 않을 수 있다. 그렇기에 설계 시 매설 당시의 수리 조건뿐만 아니라, 운영 단계에서의 수리 조건의 변화를 고려해주어야 한다.

상수관망이 많은 관들로 이루어져 있기에, 각 관의 관경을 결정하는 것은 간단한 문제가 아니다. 이에 많은 연구에서는 해당 문제를 해결하기 위해서 LP, Genetic Algorithm, Simulated Annealing Approach, Shuffled Frog Leaping Algorithm, Ant Colony Optimization Algorithm, Harmony Search와 같은 최적화 기법을 도입하여 최적 관경을 결정하고자 했다([1]-[7]). [1]-[7]의 연구뿐만 아니라 다양한 상수관망 최적 설계 연구에서는 공사비 및 유지비와 같은 비용을 최소화하는 목적함수를 사용하였다. 상수관망의 설계 시 한정된 비용을 활용하여 공사비를 줄이는 것은 중요한 문제인 것은 사실이다. 그러나 환경 문제가 대두되면서 비단 비용뿐만 아니라 환경 영향을 줄이는 좀 더 환경을 고려한 설계인 지속가능한 개발에 관심이 커지고 있다.

상수관망 뿐만 아니라 사회 기반 시설물들에 필요한 재료를 추출, 가공하는 과정 및 운반 그리고 시설물의 실제 공사, 운영, 그리고 해체 시에 여러 환경 문제를 야기하는 폐기물, 대기오염 산출물, 그리고 온실가스가 발생하게 된다. [8]-[10]의 연구에서는 상수관망에서 발생하는 온실가스를 통한 상수관망의 설계를 진행한 바 있다. [11]의 연구는 생애주기 에너지 분석 (LCEA, Life Cycle Energy Analysis)을 상수관망에 최초로 적용을 하였다. 이 때 관의 제조에서 운영 그리고 폐기에 이르기까지 소비되는 에너지를 정량화한 방법론을 제안하였으며, 이를 뉴욕시 관망에 적용하여 각 인자 별 민감도 분석을 통해 제안한 방법론을 검증하였다. [12]는 [11]에서 제안한 방법론을 수정하여 설계 단계의 상수관망의 최적 생애주기를 결정한 바 있다. 그러나 아직 해당 방법론을 통해 상수관망의 최적 설계가 이루어진 예는 없다.

본 연구에서는 [12]가 [11]의 연구에서 제안한 LCEA

방법론을 수정한 방법론을 통해 상수관망의 최소 에너지 설계를 실시하였다. 에너지를 사용할 경우 앞서 언급한 대로 상수관망의 재료의 추출 및 가공 시 그리고 실제 운영 시 펌프의 운영에 소비되는 에너지의 환경 영향을 동시에 고려할 수 있다는 장점이 있다. 더불어 비용이 사용할 때에 비해 환율 혹은 물가 상승에 대한 변동성이 없거나 적은 장점이 있다. [12]가 개발한 모형은 최적화 기법을 포함하고 있지 않아, 최적 설계를 위해 모형의 일부가 수정되었으며, 기본적인 가정은 동일하다. 최적화 기법으로는 [13]에 의해 제안된 자연세계의 진화과정에 기초하여 최적화 문제를 해결하는 기법인 유전자 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 적용하였다. 본 연구에서 개발한 모형은 생애주기 동안의 노후와 파손을 모의가 가능하고 수리해석 프로그램인 EPANET2.0과 연동하여 수리학적 조건들을 고려해 주었다. 개발한 모형은 A와 B 관망에 적용하여 최소 에너지 설계를 실시하였다. 최소 에너지 설계 결과는 A와 B 관망의 최적 비용 설계 결과로 알려진 관경 조합의 결과와의 비교를 통해 에너지 기반 설계의 효과를 분석하였다.

## 2. 방법론

### 2.1 모형 소개

본 연구에서 개발한 모형은 [12]가 개발한 모형을 기반으로 구축되었으며, 기본적인 알고리즘은 Fig.1과 같이 유전자 알고리즘을 기반으로 하고 그 일련의 과정 중에 LCEA를 통한 최적화를 실시한다. 모형 시작 시 최초 해집단을 구성하며 이 단계에서 초기 관경 조합을 결정한다. 그 후 선택, 교배 및 돌연변이를 통해 최적화가 진행이 되며, 교배 및 돌연변이 확률은 각각 0.85, 0.05의 고정된 값을 사용하였다. 해당 과정은 사용자가 지정한 반복 횟수가 만족할 때까지 반복된다. 최적화 모형이 진행될 때 결정된 해집단의 관경 정보를 바탕으로 Fig.2와 같이 생애주기 에너지 분석을 진행한다. 생애주기 에너지 분석은 제조 단계, 유지 및 관리 단계, 그리고 해체 단계 총 세 단계로 진행되며, 각 단계에서 상수관망을 구성하는 각 관에 대한 에너지 소비량을 산정한다. 본 연구에서 개발한 모형의 목적함수는 연간 총 에너지 소비량의 최소화이다. 연간 에너지 소비량은 식 (1)과 같이 각 단계 별로 산정된 에너지 소비량의 총 합을 생애주기로

나는 것으로 정의한다.

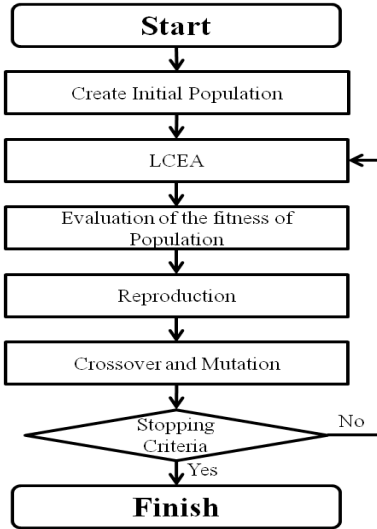


Fig. 1. Flow chart of the modified LCEA optimization model

Minimize

$$F = E_{Tot} / LC \quad (1)$$

여기에서  $F$ 는 연간 에너지 소비량(GJ/year),  $E_{Tot}$ 는 총

에너지 소비량 (GJ), 그리고  $LC$ 는 생애주기 (years)이다.

제조단계는 상수관망을 구성하는 관의 제조가 이루어지는 단계로 관 제조에 필요한 원자재를 추출하는 과정에서부터 재료의 가공 및 생산 등, 관의 제조 및 생성에 해당하는 일련의 모든 과정을 포함한다. 제조 단계에서는 결정된 관경을 토대로 수리학적 조건을 고려하기 위한 수리해석을 EPANET2.0 프로그램을 통해 실시한다. 이 때 각 수요절점에서의 수압 조건을 고려해 주었으며 각적용 관망 별로 다르게 적용된다. 설정한 수압 조건에 만족할 경우 결정된 관경 조합을 바탕으로 제조 단계에서 소비되는 총 에너지를 계산한다. 만일 수압 조건에 만족하지 않는다면 관경 조합을 다시 결정한다.

유지 및 관리 단계는 결정된 관경 조합에 대한 관의 노후 혹은 파손 여부에 따른 실제 운영모의를 하는 단계이다. 본 연구에서 개발한 모형은 [12]의 모형에 기반하기에 유지 및 관리 단계의 생애주기 분석에 사용되는 모든 가정과 방법론은 동일하게 적용되었다. 모형은 시간의 흐름에 따른 관의 노후와 파손 확률을 산정하고, 노후도에 따라 관을 갱생 혹은 교체하거나, 파손 확률에 따른 관의 보수 여부를 결정한다. 그리고 제조 단계와 마찬가지로 매 모의시기마다 수압 조건을 고려해 주는데, 해당 모의시기의 노후도 조건을 EPANET2.0 프로그램으로

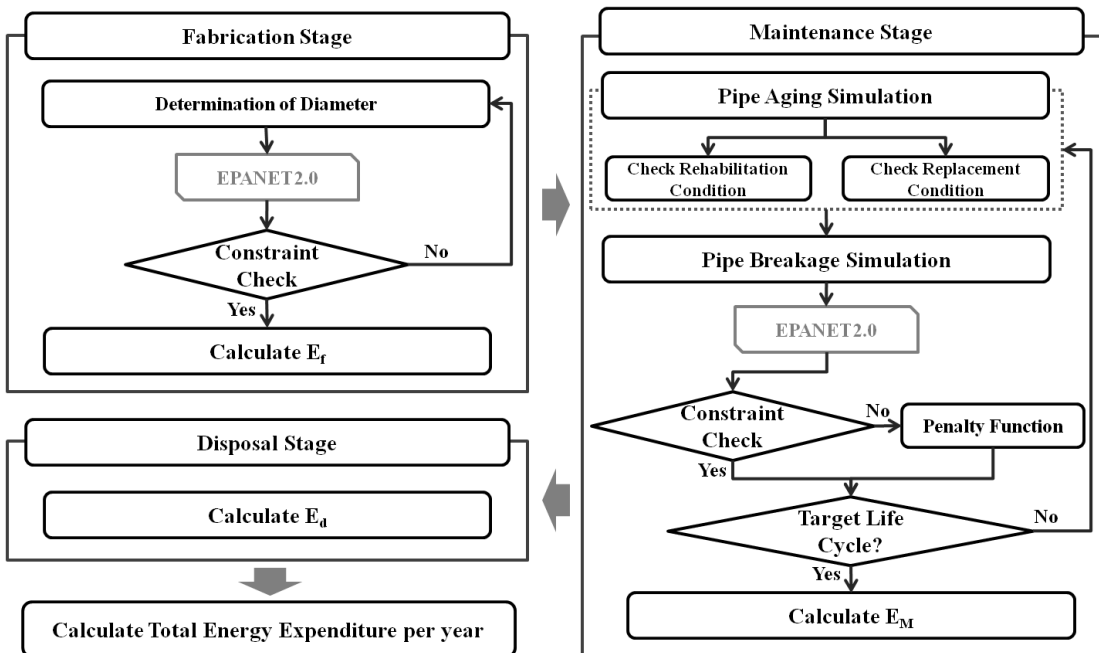


Fig. 2. Schematic diagram of the modified LCEA embedded in the optimization model shown in Fig. 1

전달하여 노후에 따른 변화를 모의해준다. 제조 단계에서는 초기 환경 결정 시 수압 조건을 만족하지 않을 경우에 환경을 다시 결정하지만, 유지 및 관리 단계에서는 이를 다시 결정할 수 없기에, 최종 목적함수 값에 임의의 큰 값을 페널티로 부과하여 해당 환경 조합이 선택되지 않도록 유도한다. 수리학적 조건이 모두 만족한다면 사용자가 설정한 목표 생애주기가 되었는지 확인 후 만족할 시 총 유지 및 관리 에너지 소비량을 산정하고, 만족하지 않는다면 앞의 과정을 반복한다. 총 유지 및 관리 에너지 소비량은 유지 및 관리 단계에서 실시하는 각종 개량에 소비되는 에너지와 개량을 통한 개선 이익을 통해 계산한다.

해체 단계는 상수관망의 사용성이 저감되어 철거하는 단계로, 목표 생애주기가 끝났을 때이다. 목표 생애주기에 다다르면 해체 에너지 소비량을 산정하고 식 (1)에 따라 목적함수 값을 계산한다.

본 연구에서 개발한 모형은 [12]의 모형이 가지고 있는 많은 가정 사항에 따라 한계가 있다고 할 수 있으나, 상수관망의 에너지 기반 설계를 실시하고 향후 보안을 통해 좀 더 지속 가능한 설계의 토대를 구축한다는 것에 의미가 있다. 그렇기에 모형은 모든 가정과 식들은 필요한 경우 좀 더 정확한 방법론의 도입이 용이하도록 구축되어, 향후 추가 연구에 활용 할 수 있다. 마지막으로 기존의 비용 최적 설계와의 비교를 통해 에너지 기반 설계가 비용 면에서 합리적인지를 확인할 수 있다.

## 2.2 단위 에너지

단위 에너지는 제조 단위 에너지와 해체 단위 에너지 두 가지로 정의되며, 각각은 관의 제조 혹은 해체 시 환경 별로 정의되는 길이당 에너지 값이다. [11]은 5개의 환경에 대해서만 제조 및 해체 단위 에너지를 제안하여 적용에 한계가 있었고, 이에 [14]은 환경과 각 단위 에너지의 관계를 유도했으며, 이는 식 (2)~(3)과 같다.

$$e_f = 4.206 \times D^{1.9959} \quad (2)$$

$$e_d = 0.2974 \times D^{2.0248} \quad (3)$$

여기에서  $e_f$ 는 제조 단위 에너지(GJ/m),  $e_d$ 는 해체 단위 에너지(GJ/m)이며  $D$ 는 관경(m)이다.

## 2.3 제조 단계

제조단계에서 결정된 환경 조합에 대한 수리학적 요구 조건이 모두 충족할 경우 제조 에너지 소비량을 산정한다. 제조 에너지 소비량은 아래 식 (4)와 같이 계산되며, 이때 관의 운송 및 설치에 필요한 에너지는 제외한다.

$$E_f = \sum_i^p L_i e_f \quad (4)$$

여기에서  $E_f$ 는 제조 에너지 소비량(GJ),  $p$ 는 총 관의 수,  $L_i$ 는  $i$ 번 관의 길이(m),  $e_f$ 는 관의 제조 단위 에너지 계수(GJ/m)이다.

## 2.4 유지 및 관리 단계

유지 및 관리 단계에서 관의 노후 및 파손에 따른 개량이 실시되며, 각 개량은 에너지를 소비한다. 본 연구에서는 갱생, 교체, 그리고 보수 총 3가지의 개량 에너지 소비량을 고려했으며, 아래 식(5)와 같다.

$$E_S = E_{rep} + E_{rh} + E_{rp} \quad (5)$$

여기에서,  $E_S$ 는 개량 에너지 소비량(GJ),  $E_{rep}$ 는 교체 에너지 소비량(GJ),  $E_{rh}$ 는 갱생 에너지 소비량(GJ),  $E_{rp}$ 는 보수 에너지 소비량(GJ)이다.

관이 개량되면 누수 저감, 펌프의 효율 증가 및 기타 개선이익이 발생하는데, 이 때 절감되는 에너지 소비량을 회복 에너지로 정의하였다. 총 유지 및 관리에 필요한 총 에너지 소비량은 개량 에너지와 회복 에너지의 차이를 통해 계산할 수 있으며, 아래 식 (6)과 같다.

$$E_M = E_S - E_{rc} \quad (6)$$

여기에서,  $E_M$ 는 총 유지 및 관리 에너지 소비량(GJ),  $E_S$ 는 개량 에너지 소비량(GJ),  $E_{rc}$ 는 회복 에너지 소비량(GJ)이다.

### 2.4.1 교체 에너지 소비량

교체 에너지 소비량은 식(7)을 통해 계산할 수 있다. 교체 시 새로운 관의 제조와 기존 관의 폐기가 포함된다. 이에 [12]에서 교체 에너지 소비량을 제조와 폐기 에너지 소비량의 합으로 가정하였다.

$$E_{rep} = \sum_i^p L_i \{n_{rep}(e_f + e_d)\} \quad (7)$$

여기에서,  $E_{rep}$ 는 교체 에너지 소비량(GJ),  $p$ 는 총 관의 수,  $L_i$ 는  $i$ 번 관의 길이(m),  $n_{rep}$ 는 관의 교체 횟수,  $e_f$ 는 제조 단위 에너지(GJ/m),  $e_d$ 는 해체 단위 에너지(GJ/m)이다.

#### 2.4.2 갱생 에너지 소비량

[12]는 갱생 에너지 소비량을 식 (8)과 같이 정의하였다. 해당 식은 [15]가 갱생 비용이 교체 비용의 대략 65%라고 한 것에 근거하여 정의되었다. 비용과 에너지는 근본적으로 차이가 있지만, 비용 면에서의 비율이 에너지 측면에서도 유효하다고 가정하고 갱생 에너지 소비량을 교체 에너지 소비량의 65%로 가정하였다.

$$E_{rh} = \sum_i^n L_i (n_{rh} \times 0.65e_f) \quad (8)$$

여기에서,  $E_{rh}$ 는 갱생 에너지 소비량(GJ),  $p$ 는 총 관의 수,  $L_i$ 는  $i$ 번 관의 길이(m),  $n_{rh}$ 는 관의 갱생 횟수,  $e_f$ 는 제조 단위 에너지(GJ/m)이다.

#### 2.4.3 보수 에너지 소비량

[12]의 연구에서 보수 에너지를 산정하기 위해서 파손 확률 함수를 사용하였다. 확률에 따른 보수 에너지는 실제 소비된 것은 아니지만, 해당 시기까지 보수가 이루어지지 않을 경우 보수에 예상되는 에너지로 생각할 수 있다. 이에 따라 보수 에너지 소비량은 식 (9)와 같다.

$$E_{rp} = \sum_i^p e_{bi} L_i N(t) \quad (9)$$

여기에서,  $E_{rp}$ 는 보수 에너지 소비량(GJ),  $p$ 는 총 관의 수,  $e_{bi}$ 는 보수 단위 에너지로 보수 시에 보수에 필요한 단위 에너지이며,  $L_i$ 는  $i$ 번 관의 길이(m),  $N(t)$ 는 해당 년도의 관 파손 확률 함수(Breaks/km/year)이다. 보수 단위 에너지는 정확한 정의는 어렵지만, [11]은 이를 식 (10)과 같이 정의하였다.

$$e_{bi} = 2L_0 e_f \quad (10)$$

여기에서,  $L_0$ 는 일반적인 파손 길이(m/Break)이고,  $e_f$ 는 관의 제조 단위 에너지 계수(GJ/m)이다.

또한 [12]는 관 파손을 아래 식 (11)으로 제안하였다. 해당 식은 [16]이 [17]가 제안한 관 파손율 공식을 수도 권지역의 강관 파손율 자료를 바탕으로 수정한 식이다. 파손율 함수는 매설 지역의 정보를 바탕으로 구해야 하지만, 매설 전 설계 단계의 관망의 경우 가장 쉽게 적용할 수 있는 식으로 선택한 것이다. 즉, 후에 매설 지역에 대한 정확한 정보를 토대로 수정해야 한다.

$$N(t) = (0.3882 \times 10^{-6})^{0.165(t-t_0)} \quad (11)$$

여기에서,  $N(t)$ 는 해당년도의 관 파손율(Breaks/km/year),  $t_0$ 는 매설 시기(year)이며,  $t$ 는 매설 기간(year)이다.

#### 2.4.4 관의 노후도

[12]는 [18]가 제안한 식 (12)를 토대로 노후도를 Hazen-Williams C값으로 정량화하였고, 이를 EPANET2.0에 입력하여 생애주기 동안의 시간 흐름에 따른 노후를 모의하였다.

$$c = 130 \left( 1 - \frac{a\sqrt{y}}{D} \right)^b \quad (12)$$

여기에서,  $C$ 는 Hazen-Williams C값,  $D$ 는 관경(mm),  $y$ 는 매설 혹은 교체 후 경과년도(year),  $a$ 와  $b$ 는 관경에 따른 계수로 [19]은  $a$  값과  $b$  값을 각각 식 (13)-(14)로 제안하였다.

$$a = 0.0961659D + 1.15507 \quad (13)$$

$$b = 0.723076D^{-0.0660117} \quad (14)$$

관의 갱생과 교체는 노후도가 특정 값이 되었을 때 진행되는데, [12]는 갱생의 경우 C값이 90 이하가 되면 실시하고 갱생 후에는 구조적 강도의 불이익을 감안하여 C값이 110으로 회복하는 것으로 가정하였다. 또한 교체의 경우 관의 구조적 강도를 감안하여 두 번의 갱생 후에 C값이 다시 80 이하가 되면 실시하는 것으로 가정하였다. 이는 국내 수도사업소에서 관의 수명을 대략 25년에서 35년 정도로 제시한 것을 바탕으로, 해당 기간에서 식(12)를 통한 관경 별 노후도를 평가하여 제안한 가정

이다. 정확한 모의를 위해서는 좀 더 구체적인 가정을 근거로 수정을 하여야 하지만, 본 연구는 최적 설계에 중점을 두기에, [12]가 제안한 가정을 임시로 사용하였다. 후에 개량에 대한 연구를 통해 구체적인 방법론의 고찰이 이루어져야 한다.

2.4.5 회복 에너지

[12]는 개량에 따른 회복 에너지를 각 수요 절점에서의 회복 되는 수두를 펌프의 에너지로 환산하여 식(15)와 같이 정량화했다.

$$E_{rc} = \frac{1}{p_e} \sum_i^m (E_{p,i}^r - E_{p,i}^s) \tag{15}$$

여기에서,  $E_{rc}$ 는 회복 에너지(GJ),  $p_e$ 는 펌프 효율,  $m$ 은 관의 총 개수,  $E_{p,i}^r$ 는 개량 전 거친 관일 때 필요한 펌프 에너지,  $E_{p,i}^s$ 는 개량 후 매끈한 관일 때 필요한 펌프 에너지이다.

2.5 해체 단계

해체 에너지 소비량은 식 (16)과 같이 정의한다.

$$E_d = \sum_i^p L_i e_d \tag{16}$$

여기에서  $E_d$ 는 해체 에너지 소비량(GJ),  $e_d$ 는 해체 단위 에너지(GJ/m)이다.

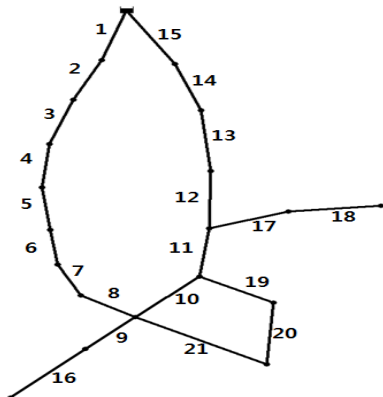


Fig. 3. Study network A's layout

3. 적용 및 결과

3.1 적용 관망

본 연구에서는 개발한 모형을 A와 B 두 관망에 적용하였다. A와 B 두 관망은 모두 실제 최적화 문제에서 많이 사용된 관망으로 뉴욕시 관망과 고양시 관망에서 형태만 차용하였다. 형태만 차용한 것은 본 연구에서 개발한 모형이 가지고 있는 가정 사항을 만족하도록 하기 위함이다. 이에 관의 재질은 주철관으로 가정하고 매설 지역 역시 수도권 지역으로 가정하여, 노후도 식 및 관의 파손 확률을 적용에 문제가 없도록 하였다. 또한 두 관망 모두 설치 전 설계 단계의 상수관망으로 가정하여 초기 C 값이 130으로 통일된 값을 설정하였다.

A 관망은 총 21개의 관과 19개의 수요 절점으로 구성되며 91m (300ft) 수두의 저수지로부터 물을 공급한다. 16번과 17번 수요절점의 요구 압력은 각각 79m (260ft), 83m (272.8ft)이며 그 외에 나머지 수요절점에서는 77m (255ft)의 요구 압력을 만족해야 한다. 후보 관경은 914mm (36in)부터 5,182mm (204in)까지 총 15가지이다.

B 관망은 30개의 관과 22개의 수요절점으로 구성되며 71m 수두의 저수지에서 펌프를 통해 물을 공급 받는다. 모든 수요 절점에서의 요구 압력은 15m이다. 후보 관경은 80mm부터 350mm 까지 총 8가지이다. A 관망의 총 수요량은 57,129 Lps, B 관망은 30 Lps로 A 관이 B 관망에 비해 규모가 월등히 크다.

관망의 최적 설계는 기존에 각 관망이 최적화문제에서 사용된 조건과 동일하게 하였다. A 관망의 경우 기존 관에 병렬 관을 추가함으로써 요구압력을 충족하고, B 관망의 경우 모든 관의 관경을 결정함으로써 요구압력을

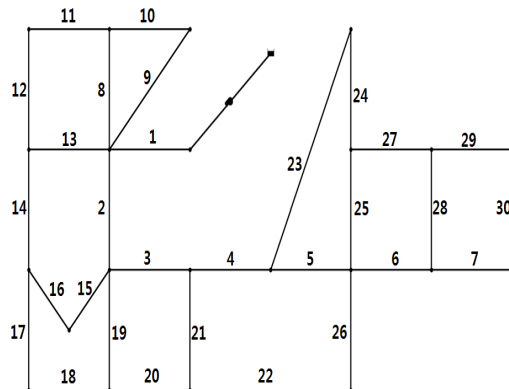


Fig. 4. Study network B's layout

**Table 1.** Optimized energy & cost comparison between two different designs (A network)

	Cost design	Energy design
Total Energy Expenditure (TJ)	8025.72	8796.48
Total Energy Expenditure per year (TJ/yr)	360.34	266.56
Life Cycle (year)	22	33
$E_f$ (TJ)	7376.00	8120.13
$E_{rh}$ (TJ)	0.00	8.50
$E_{rep}$ (TJ)	10.80	73.01
$E_{rp}$ (TJ)	0.00	0.00
$E_d$ (TJ)	540.75	594.95
$E_{rc}$ (TJ)	0.00	0.05
Cost (\$)	36,660,000	62,903,300
Cost (\$/yr)	1,666,364	1,906,161

충족하도록 설계를 실시한다. A 관망과 B 관망 모두 개발한 모형을 바탕으로 최적 설계를 실시하였으며, 기존에 비용 최적 설계 값으로 알려진 관경 조합에 대한 생애 주기 에너지 분석을 추가로 실시하여 에너지와 비용 최적 설계를 비교하였다.

### 3.2 적용 결과

#### 3.2.1 A시 관망 적용 결과

A 관망의 비용 최적 설계는 여러 연구에서 다양한 최적화 방법으로 실시했다. [20]은 78.09 (mUSD)의 최적해를 LP와 DP를 이용하여 제시하였고, [3]은 37.13 (mUSD)의 최적해를 유전자 알고리즘을 통해 제시하였다. [21]은 모의담금질법 기반 최적 설계로 [3]의 최적해와 같은 결과를 제시하였으며, [7]은 화음탐색법을 통해 36.66 (mUSD)의 최적해를 제시하였다. 본 연구에서는 이들 연구 중 최소 비용인 [7]의 결과를 개발한 모형을 통해 생애주기 에너지 분석을 실시하였고, 해당 결과는 A 관망에 에너지 최적 설계를 실시한 결과와 함께 Table. 1에 정리하였다. [7]에서 실시한 비용 최적 설계와 개발한 모형으로 실시한 생애주기 에너지 분석은 수요 절점에서 요구 수압 및 병렬 관의 관경을 결정하는 조건은 같으나, Hazen-Williams C 값을 적용하는 것에서 차이가 난다. 개발한 모형은 생애주기를 고려하여 초기 Hazen-Williams C 값이 130에서 시간에 따른 관의 노후를 식 (12)에 따라 감소시키나, [7]의 비용 최적 설계 시에는 Hazen-Williams C 값을 모든 관에서 100으로 고정하여 관경을 결정하였다. 그 외에 모든 수요절점 및 관의 조건은 동일하게 설정하고 모의하였다. [7]에서 제시한 병렬관의 관경과 에너지 최적 설계 시 병렬관의 관

경을 Table. 2에 기존 매설되어 있는 관경과 함께 정리하였다. 관경이 0으로 표기된 것은 병렬관의 추가가 요구되지 않는 곳이라 할 수 있다. Existing으로 표기된 부분은 기존에 매설되어 있는 A 관망의 관경을 의미한다.

**Table 2.** Parallel pipe sizes comparison of the two different design solutions (A network)

Link ID	Diameter(mm)		
	Existing	Cost Design	Energy Design
1	4572	0	0
2	4572	0	0
3	4572	0	0
4	4572	0	0
5	4572	0	0
6	4572	0	0
7	3353	2438	0
8	3353	0	0
9	4572	0	0
10	5182	0	0
11	5182	0	1829
12	5182	0	914
13	5182	0	2134
14	5182	0	3962
15	5182	0	1829
16	1829	2438	2438
17	1829	2438	2743
18	1524	2134	2134
19	1524	1829	2438
20	1524	0	0
21	1829	1829	1829

비용 최적 설계의 생애주기 에너지 분석 결과 연간 에너지 소비량이 360.34TJ/yr이며 생애주기는 22년이다. 각각의 에너지 별로 보면, 대부분의 에너지가 제조 에너지로 구성된다. 이는 짧은 생애주기인 22년 안에 관의 개량이 이루어지지 않기 때문이다. 가장 작은 관경인 1,524mm 관의 갱생은 식 (12)와 방법론에서 가정한 갱

생 계획에 따라 매설 후 34년이 될 때 실시한다. 이에 갱생과 교체의 경우 에너지가 0의 값을 가진다. 보수로 인한 가량 에너지는 발생하지만, 이 값은 제조 에너지에 비하면 매우 작은 값이다. 앞서 [7]이 최적 설계 시 Hazen-Williams C 값을 100으로 고정하였다고 언급하였는데, 식 (12)에 따라 3,353mm 이사의 관경의 관이 100이하의 값으로 감소함을 알 수 있다. 이에 따라 Fig. 5에 볼 수 있듯이 18번 수요 절점에서 수두가 매설 후 22년에 최소 수두 조건 (fig. 5에서 아래 붉은 점)에 매우 근접하게 감소한다. 그리고 매설 후 23년이 지나면 해당 수요 절점에서 수두 조건에 만족하지 않아 최적 생애주기가 22년으로 결정된다.

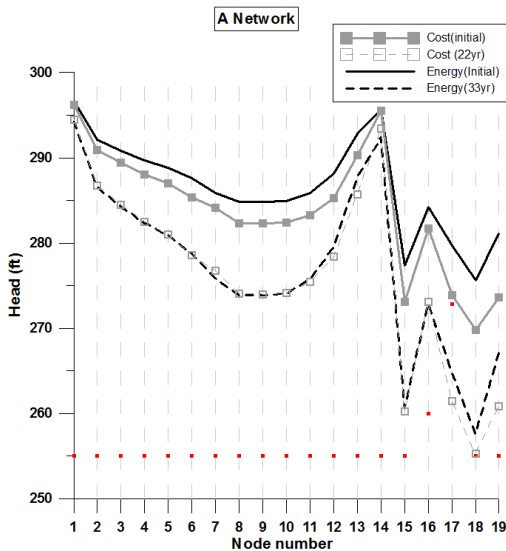


Fig. 5. Pressure distributions before and after the two optimal designs (A network)

개발한 모형을 통한 A 관망의 에너지 최적 설계 시 비용 최적 설계에 비해 연간 에너지 소비량이 30% 가량 감소하고 동시에 생애주기는 11년 길어진 것을 알 수 있다. 다만 Table. 2에서 확인 할 수 있듯이 신규로 설치해야 하는 병렬관의 개수는 늘어 총 에너지 소비량은 비용 최적 설계에 비해 증가한 것을 알 수 있다. 하지만 길어진 생애주기를 고려한 연간 총 에너지 소비량은 앞서 언급한대로 30% 가량 감소한다. 각각의 에너지에서 살펴보면, 가장 작은 관경인 914mm 관의 갱생이 매설 후 32년 차에 실시되어 갱생 에너지가 발생함을 알 수 있다. 그러나 그 크기가 크지 않기에 비용 최적 설계와 마찬가지로

지로 제조 에너지가 상당한 부분을 차지 함을 알 수 있다. 생애주기가 33년으로 선택된 것은 기존에 매설되어 있는 관 중 1,524mm 관의 갱생의 영향이 크다고 할 수 있다. 해당 관경의 관은 매설 후 34년에 첫 갱생이 이루어지는데, 이 때 발생하는 갱생 에너지가 커 최적 생애주기는 33년이 된다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 비용 최적 설계와는 달리 에너지 최적 설계 시 33년이 지나도 같은 18번 수요 절점에서 요구 수두가 여유가 있음을 알 수 있다. 초기 수두를 비교해 보면 에너지 최적 설계 시 전체적으로 수두에 여유를 가질 수 있음을 알 수 있고, 여유 수두만큼의 안정성 확보가 된다고 할 수 있다. 또한 비용 면에서 두 가지 최적 설계를 비교해 보면 비용 최적 설계가 총 비용 면에서 절반 가량 적은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 그러나 이 비용 역시 연간 소비 비용으로 환산할 경우 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 에너지 최적 설계 시 생애주기를 고려한다면 비용 측면에서도 큰 불이익이 없음을 보여준다고 할 수 있다.

정리하면, A 관망의 경우 개발한 모형을 통해 에너지 최적 설계를 실시할 때, 비용 최적 설계에 비해 생애주기를 늘릴 수 있으며 동시에 연간 총 에너지 소비량은 줄일 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 연간 에너지 소비량을 목적 함수로 한 이유가 상수관망의 매설 후 사용기간을 늘리는 방안이 될 수 있기 때문이며, 실제 모형을 통한 모의 결과 이러한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.2.2 B시 관망 적용 결과

B 관망의 경우 [22]에서 처음 적용하였으며, GAMS/MINOS를 통해 최적 설계를 진행하여 실제 B 관망의 비용은 179,428,600원을 179,142,700원으로 감소한 최적값을 제안했다. 그 후 [7]이 회음 탐색법을 통해 비용 최적 설계를 진행하였고 177,135,800원의 최적 값을 제안했다.

본 연구에서는 에너지 기반 최적 설계와의 비교를 위해 B 관망 최소 비용으로 알려진 [7]이 제안한 관경 조합을 비용 최적 설계 관경 조합으로 채택하였다. A 관망 비교 시와 마찬가지로 모든 관 및 수요절점의 정보는 동일하게 하였고, Hazen-Williams C 값의 적용만 다르게 하였다. [7]은 앞서 A 관망과 마찬가지로 C값을 100으로 고정하고 최적 설계를 진행하였다. B시 관망의 적용 결과는 Table.3에서 확인할 수 있으며, Table. 4에 각 관 별로 비용 및 에너지최적 설계 시 최적 관경을 정리하였다.



**Table 3.** Optimized energy & cost comparison between two different design (B network)

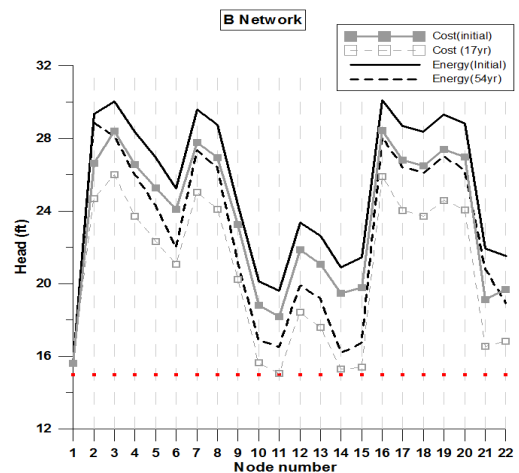
	Cost design	Energy design
Total Energy Expenditure (GJ)	180.24	504.90
Total Energy Expenditure per year (GJ/yr)	10.60	9.35
Life Cycle (year)	17	54
$E_f$ (GJ)	168.88	209.72
$E_{rh}$ (GJ)	0.00	272.63
$E_{rep}$ (GJ)	0.11	60.29
$E_{rp}$ (GJ)	0.00	0.00
$E_d$ (GJ)	11.25	14.02
$E_{rc}$ (GJ)	0.00	52.03
Cost (Won)	177,135,800	415,233,268
Cost (Won/yr)	10,419,753	7,689,505

**Table 4.** Pipe sizes comparison of the two design solutions (B network)

Link ID	Diameter(mm)	
	Cost Design	Energy Design
1	150	200
2	150	125
3	125	125
4	150	125
5	100	100
6	100	125
7	80	80
8	100	80
9	80	100
10	80	80
11	80	80
12	80	80
13	80	80
14	80	100
15	80	100
16	80	80
17	80	80
18	80	125
19	80	100
20	80	100
21	80	100
22	80	80
23	80	80
24	80	80
25	80	125
26	80	125
27	80	80
28	80	150
29	80	80
30	80	125

B 관망의 비용 최적 설계 관경 조합에 대한 생애주기 에너지 분석 결과, 총 에너지 소비량은 180.24GJ이며 최적 생애주기는 17년으로 연간 에너지 소비량은 10.6GJ/yr로 나타났다. 해당관경 조합에서 가장 작은 관경인 80mm

관은 매설 후 13년 차에 식 (12)에 따라 C값이 100 이하로 감소하지만, 매설 후 18년이 될 때 까지는 각 수요 절점에서 수압 조건이 모두 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 6은 B 관망의 각 수요 절점 별 수압 분포를 나타내는데, 비용 최적 설계 관경 조합에 대해 매설 후 17년 차에 11번, 14번 수요 절점에서 수압 조건에 근접한 수압을 나타냄을 확인 할 수 있으며, 해당 수요 절점들은 18년 차에 수압 조건을 만족하지 않게 된다. 즉 B 관망의 경우에도 A 관망과 마찬가지로 수압 조건을 만족하지 않아 최적 생애주기가 결정된 것을 알 수 있다. 각각의 에너지 들에서 보면, A 관망과 유사하게 제조 에너지가 대부분을 차지함을 알 수 있다. 가장 작은 관경이 80mm 관의 갱생은 식 (12)와 방법론의 갱생 계획에 따라 매설 후 20년차에 처음 이루어지기 때문에 생애주기 17년에는 갱생 에너지가 포함 되지 않는다.



**Fig. 6.** Pressure distributions before and after the two optimal design (B network)

B 관망의 개발한 모형을 통한 에너지 기반 최적 설계 시, 총 에너지 소비량은 504.9 GJ로 비용 최적 설계에 비해 대략 2.8배 정도 증가하지만, 생애주기는 3배 정도 길어진 54년이다. 이에 따라 연간 에너지 소비량은 비용 최적 관망 조합보다 대략 12% 가량 낮은 9.35GJ/yr가 소비된다. A 관망과 마찬가지로 수압 조건보다는 관의 개량에 따라 생애주기가 결정된다. 다만, A 관망과는 다르게, 개량을 통해 생애주기가 길어진 경우로 모든 관이 두 차례 갱생된다. 매설 후 55년 차에는 80mm 관의 교체 실시되는데, 이때 소비되는 에너지가 커 최적 생애주기는 54년으로 결정된다. A 관망과 다르게 개량이 수 차례 이루어지기에, 갱생 에너지가 가장 높은 비율로 발생하고, 이에 따른 회복 에너지도 상당량 발생한다. 이러한 회복 에너지는 소비의 개념이 아닌 절감의 개념이기에 생애주기가 길어지는 것에 영향을 주고, 이러한 회복 에너지가 B 관망의 경우 개량의 효과가 큼을 말해준다.

B 관망의 비용 측면에서의 비용 최적 설계와 에너지 최적 설계를 비교해 보면, 역시 비용 최적 설계의 총 비용이 절반 이상 적음을 알 수 있다. A 관망에 비해 더 큰 비용 차이를 나타내는 이유는 Table.4에서 볼 수 있듯이 대부분의 관경이 확대된 영향도 있지만, B 관망의 경우 초기 비용에 갱생에 대한 비용이 추가되기 때문이다. 갱생에 대한 비용은 교체 비용의 65%로 가정하여 임의로 사용하였으며 이에 따라 초기 비용에 추가하여 총 비용을 산정하였다. 다만, 총 비용과는 달리 비용을 연간 비용으로 환산할 경우 길어진 생애주기 영향으로 오히려 에너지 최적 설계의 경우 비용 최적 설계에 25% 가량 적은 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서 제안한 모형을 사용하여 에너지 기반 최적 설계를 진행할 경우 개량에 의한 효과가 커 생애주기가 길어질 경우 연간 비용도 감소할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 생애주기 에너지 분석을 최적화 기법인 유전자 알고리즘과의 연계를 통해 상수관망의 최적 설계프로그램을 제안하였다. 해당 프로그램은 상수관망의 생애주기 동안의 관의 노후 및 파손 같은 변화를 내부적으로 모의할 수 있으며, 수리해석 프로그램인 EPANET2.0 과의 연동을 통해 각 생애주기 동안의 수리

적 변화 역시 모의가 가능하다. 개발한 모형을 두 관망(A와 B 관망)에 적용하였고, 에너지 최적 설계와 기존에 비용 최적 설계 시 최소 비용으로 알려진 관망 조합에 대한 생애주기 에너지 분석을 실시하여 에너지와 비용 측면에서 비교하여 개발한 모형의 효과를 모의하였다. 결과를 보면 두 관망에 대해 모두 총 에너지 소비량과 총 비용은 증가한 것을 알 수 있다. 하지만, 두 관망 모두 에너지 최적 설계 시 연간 에너지 소비량은 감소하고 최적 생애주기는 길어져 결과적으로는 생애주기를 고려한 설계를 할 경우 에너지 소비를 감소하여 환경 영향을 줄일 수 있음은 물론 상수관망의 생애주기를 늘릴 수도 있고, 동시에 비용의 경우에도 큰 불이익이 없음을 확인하였다.

생애주기 분석에서 가장 중요한 것은 실제 상수관망을 운영하는 유지 및 관리 단계이다. 관의 특성상 노후와 파손 등의 변화는 필연적으로 발생하는 문제이고 반드시 고려해 주어야 하는 문제이나, 확실성이 크기에 쉽게 접근하기 힘든 문제이다. 본 연구에서 사용한 노후도식 및 파손율 공식 역시 정확한 모의를 한다는 보장이 없으며, 반드시 상수관망의 매설 정보 및 다양한 관종에 대한 정보를 통해 좀 더 정확한 모의를 위해 수정되어야 한다. 또한 개량에 대한 가정 역시 명확한 기준이 없기에 임의로 가정을 하였으나, 반드시 명확한 기준에 따라 수정해야 할 것이다.

개발한 모형은 향후 지속적인 연구를 위해 제안된 기초 모형으로 아직 많은 가정을 포함하고 있다. 이는 현재 국내에서 상수관망의 설계에 대한 여러 정보를 확보하기에는 어려움이 많기 때문이고, 이에 본 연구에서는 적절한 가정을 통해 모형을 구성하였으나 향후 다양한 정보를 통해 모형의 가정에 따른 문제를 해결하기 쉽도록 구축하였다. 하지만 아직 생애주기 기반으로 최적 설계가 활발히 이루어지지 않고 있으며, 기존에 많은 연구들이 최적 설계에 비용을 사용하고 있기에 새로운 개념인 에너지를 통해 상수관망의 설계를 할 수 있다는 점에서 의미가 있는 연구라고 할 수 있다.

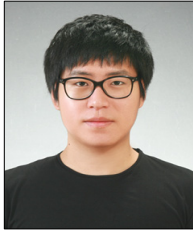
#### References

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

- DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/WR013i006p00885>
- [2] Dandy, G. C., Simpson, A. R., and Murphy, L. J. "An improved genetic algorithm for pipe network optimization.", *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 2, pp. 449 - 458, 1996.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/95WR02917>
- [3] Savic, D. A., & Walters, G. A., "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks.", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 2, pp. 67-77, 1997.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1997\)123:2\(67\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67))
- [4] Cunha, M. D. C., & Sousa, J. "Water distribution network design optimization: simulated annealing approach.", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 4, pp. 215-221, 1999.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:4\(215\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(215))
- [5] Eusuff, M. M., & Lansey, K. E., "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm.", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 3, pp. 210-225, 2003.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:3\(210\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(210))
- [6] Maier, H. R., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., Foong, W. K., Phang, K. Y., Seah, H. Y., & Tan, C. L., "Ant colony optimization for design of water distribution systems.", *Journal of water resources planning and management*, Vol. 129, No. 3, pp. 200-209, 2003.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:3\(200\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(200))
- [7] Geem, Z. W. "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search.", *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 3, 2006.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000020](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000020)
- [8] Wu, W., Simpson, A. R., & Maier, H. R.. "Accounting for greenhouse gas emissions in multiobjective genetic algorithm optimization of water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 146-155, 2009.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000020](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000020)
- [9] Wu, W., Maier, H. R., & Simpson, A. R., "Single-objective versus multiobjective optimization of water distribution systems accounting for greenhouse gas emissions by carbon pricing." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(5), 555-565, 2009.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000072](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000072)
- [10] Racoviceanu, A. I., Karney, B. W., Kennedy, C. A., & Colombo, A. F. "Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems." *Journal of Infrastructure Systems*, 13(4), 261-270, 2007.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2007\)13:4\(261\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:4(261))
- [11] Fillion, Y. R., MacLean, H. L., and Karney, B. W., "Life-Cycle Energy Analysis of a Water Distribution System.", *Journal of Infrastructure systems*, Vol. 10, No. 4, pp.120-130, 2004.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2004\)10:3\(119\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2004)10:3(119))
- [12] Lee, S.Y., Yoo, D.G, Kim, J.H., "Life Cycle Determination of Water Distribution System using Life Cycle Energy Analysis", *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 29, No.1, Feb 2015.
- [13] Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press. 1975.
- [14] Lee, S. Y., "Research on Life Cycle Energy Analysis of Water distribution System", Master's Thesis, Korea University, 2014.
- [15] KICT (Korea Institute of Construction Technology). *Research for Rehabilitation Methods Characteristic and Usage of Water Distribution System Pipe*, 2001.
- [16] Kim, H. J. "A study on the optimal decision-making model for rehabilitation of water distribution systems", Master's Thesis, Korea University, 1994.
- [17] Shamir, U., and Howard, C. D. D., "An analytic approach to scheduling pipe replacement.", *J. Am. Water Works Assoc.*, Vol. 71, No. 5, pp. 248-258, 1979.
- [18] Mononobe, Hydraulics, Iwanami, pp. 155-158, 1960
- [19] Baek, C. W. "Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Using ReHS", Master's Thesis, Korea University, 2002
- [20] Schaake, J. and Lai, D., *Linear programming and dynamic programming - application of water distribution network design*. Report 116, (MIT Press: Cambridge, MA). 1969.
- [21] Cunha, M.C. and Sousa, J. "Hydraulic infrastructures design using simulated annealing." *J. Infrastruct. Syst.*, Vol. 7, No. 1, pp. 32 - 39, 2001.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2001\)7:1\(32\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:1(32))
- [22] Kim, J. H., Kim, T. G., Kim, J. H. and Yoon, Y. N., "A study on the pipe network system design using non-linear programming." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vo. 27 No. 4, pp. 59-67, 1994.

**이 승 엽(Lee, Seungyub)**

[준회원]



- 2012년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 수자원공학 (공학석사)

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

**김 중 훈(Kim, Joong Hoon)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1986년 12월 : Virginia Polytechnic Institute & State Univ. (공학석사)
- 1992년 2월 : Univ. of Texas at Austin(공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

**유 도 근(Yoo, Do Guen)**

[정회원]



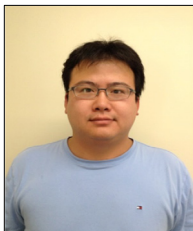
- 2007년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학박사)

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

**정 동 휘(Jung, Donghwi)**

[정회원]



- 2009년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 12월 : 애리조나대학교 토 목공학과 수자원공학 (공학박사)

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학