



수도사업자의 장래 재정계획과 연계한 상수도시설의 최적 개량계획 수립 모델 개발 연구

A Study on the Development of Optimal Renewal Planning Model in Water Supply Facilities Connected to Future Financial Plan of Water Providers

임상현·신희수·서지원·김기범·구자용*

Sanghyun Lim·Hwisu Shin·Jeewon Seo·Kibum Kim·Jayong Koo*

서울시립대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

It is considered necessary to renew a considerable number of water supply facilities in Korea because they began to be intensively buried in the period of rapid economic growth. Accordingly, local water providers are required to take measures against this situation, but they have currently been caught in a vicious circle of the lack of budget spent in renewing water supply facilities because county-based small-scale local water supply cannot afford to cover annual expenditures with their revenues from water rates. Therefore, this study developed an optimal renewal planning model capable of achieving a balance of financial revenue and expenditure in local water supply using nonlinear programming and furthermore of minimizing the total cost incurred during the analysis. To this end, this study selected the water supply area located in County Y as a research area to build the financial revenue and expenditure and used Solver function provided by Microsoft Excel to use nonlinear programming. As a result, this study developed an optimal renewal planning model minimizing incurred costs in consideration of 6 items in the financial revenue and expenditure. The optimal renewal plan was modeled according to the available annual budget. As a result, this study proposed SICD, a scenario to minimize total costs from the perspective of water suppliers, and SITS, a scenario to minimize the increase in water rates from the perspective of consumers. It can be said that the method proposed in this study is the core of the optimal financial and renewal plans as a final stage of asset management for water supply facilities. Therefore, it is considered possible for local water providers to use the method proposed in this study according to circumstances for the asset management of water supply facilities.

Key words: Asset Management, Future financial plan, Non-Linear Programming, Renewal Planning

주제어: 자산관리, 장기 재정 계획, 비선형계획법, 개량 계획

1. 서 론

우리나라의 상수도시설은 경제성장기인 1970년대,

1980년대에 집중적으로 매설되기 시작하였다. 지방공기업법 시행규칙에서는 상수도시설물의 법정내용연수를 규정하고 있으며, 제시된 법정내용연수를 토대로 2015년 초를 기준으로, 2025년까지 개·대체가 필요한 지방상수도 정수시설의 시설용량은 전체 시설용량 중 63.91%를 차지하고 있으며, 개·대체가 필요한 지방상수도 관로는

Received 16 February 2017, revised 18 March 2017, accepted 20 March 2017

*Corresponding author: Kim, Yeongkwan(E-mail: yeong@kangwon.ac.kr)

pp. 125-139

pp. 141+148

pp. 149-159

pp. 161-168

pp. 169-175

pp. 177-186

전체 관로 연장의 34.12 %를 차지하고 있다. 상당수의 시설물이 개·대체가 필요할 것으로 전망됨에 따라 지방상수도 수도사업자는 이에 대한 대응책을 마련할 필요가 있으나, 현재 군 단위 소규모 지방상수도는 요금 수입으로 운영 세출을 충당하지 못하는 상황으로, 상수도시설의 개·대체에 투자할 예산이 부족한 실정이다(MOE(Korea Ministry of Environment), 2015).

투자할 예산이 부족한 상황은 노후 상수도시설물의 누적으로 이어지며, 노후 상수도시설물의 누적은 현재도 충당하지 못하고 있는 운영 세출을 지속적으로 증가시킬 것이며, 결론적으로 투자할 예산은 현재보다 더욱 부족할 것으로 예상된다. 이러한 악순환을 해소하기 위해서는 상수도시설물의 개·대체에 소요될 비용을 충당할 수 있는 방안을 모색하는 것이라 할 수 있다.

우리나라에서 발생하고 있는 문제는 우리나라에만 국한된 문제는 아니며, 전 세계에서 발생하고 있는 문제라 할 수 있다. 선진 외국에서는 이를 대비할 수 있는 방안으로 상수도시설물을 포함한 사회기반시설물에 대한 자산관리라는 개념을 도입하고 있다. 사회기반시설물의 자산관리란, 최소의 생애주기비용을 만족시키며 원하는 수준의 서비스 수준을 달성하기 위해 수행되는 일련의 유지관리 활동으로 정의할 수 있다(IPWEA, 2015). US EPA (2010)에서는 자산관리계획 수행절차를 10단계로 제안하고 있다. 각각은 인벤토리 DB 구축, 기능 고장 분류, 시설 잔존수명 예측, 생애주기비용·개량비용 산출, 서비스 수준 분석 및 설정, 리스크 분석, 유지관리 투자 최적화, 자본 투자 최적화, 투자전략 결정, 자산관리 계획수립으로 구성되어 있다.

우리나라에서도 상수도시설물의 자산관리를 위한 연구들이 진행되고 있다. 대표적으로 MOE (2016a)는 US EPA (2010)의 자산관리 계획 수립 절차를 국내 실정에 맞게 7단계로 제안한 바 있으며, 각 단계는 인벤토리 DB 구축, 시설물의 진단·평가, 잔존수명 예측, 서비스수준 분석 및 설정, 리스크 분석 및 개량수요 분석, 최적 투자계획 수립, 재정계획 및 자산관리 기본계획 수립으로 구성되어 있다.

MOE (2016a)이 제안한 상수도시설물 자산관리 수행 절차의 각 단계들을 효과적으로 수행할 수 있는 방법론을 제안한 다양한 연구들이 있다. 이 중 최적 투자 계획 수립과 관련된 연구들은 주로 생애주기비용을 최소화하기 위한 개량 계획을 수립한 연구로 분류할 수 있다.

Kleiner (2001)은 생애주기비용에 조사 및 상태평가

에 소요되는 비용을 추가하고, semi-markov process를 활용하여 관 파손율을 예측한 결과를 토대로 개량 계획을 수립하기 위한 새로운 방법론을 제안하였다. Dandy and Engelhardt (2001)은 생애주기비용으로 교체비용, 보수비용, 피해비용을 고려하였으며, 유전알고리즘을 활용하여 생애주기비용을 최소화함과 동시에 수리적으로도 적합한 관경을 선택할 수 있는 개량 계획 수립 방법론을 제안하였다. Hong et al (2006)은 비동차 포아송분포를 활용하여 상수도관로의 파손 빈도를 도출하고, 생애주기비용을 최소로 할 수 있는 투자계획을 제안하였다. Dridi et al (2008)은 다목적 유전알고리즘인 IGA (Island genetic algorithm), NPGA-2 (Niche pareto genetic algorithm), NSGA-2 (Non-dominated sorting genetic algorithm)을 이용하여 개·대체비용이 최소인 개량계획을 수립하기 위한 방법론을 제안하였다. Kleiner et al (2010)은 선행연구에서 개발한 비동차 포아송모델을 개발한 뒤 개별관로의 파손 패턴을 예측하고, 경제적인 관점에서 최적의 개량계획을 수립하기 위한 연구사례를 제시하였다. Kim (2015)은 상수도관의 구조적인 안전성 예측 결과와 상수도관 개·대체의 경제성 예측 결과를 토대로, 동적계획법을 활용하여 수도사업자의 예산조건하에서 생애주기비용을 최소로 할 수 있는 개량계획 수립 모델을 제안하였다. Shin et al (2016)은 유전알고리즘을 활용하여 수도사업자의 예산조건하에서 상수도관 개량시 수리적인 관점에서 최적의 관경을 설정함과 동시에 생애주기비용이 최소가 되는 개량계획 수립 모델을 제안하였다.

해당 연구들은 각각의 방법론을 이용하여 최적의 개량계획을 수립하였으나, 수도사업자가 실제로 활용할 수 있는 예산의 범위를 정량화하여 고려하지 못하였다는 점에서 한계를 갖고 있다. 또한 중장기적인 관점에서 수도사업자가 수도사업을 지속할 수 있는 최적의 재정계획을 수립할 수 있는 연구는 이루어진 바가 없다. 수도사업자의 재정 상황을 종합적으로 고려한 개량 계획이 수립되지 못한다면, 최적의 개량계획 수립 방법론을 적용한다고 하더라도, 수도사업자의 재정 여건은 호전되지 못할 수 있다.

이에 본 연구에서는 수도사업자의 장래 재정 계획을 고려하여 최적의 개량계획은 무엇인지, 최적의 개량계획을 실시하기 위해서 수도사업자의 재정 수지를 어떻게 변화해야하는지를 도출할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다.

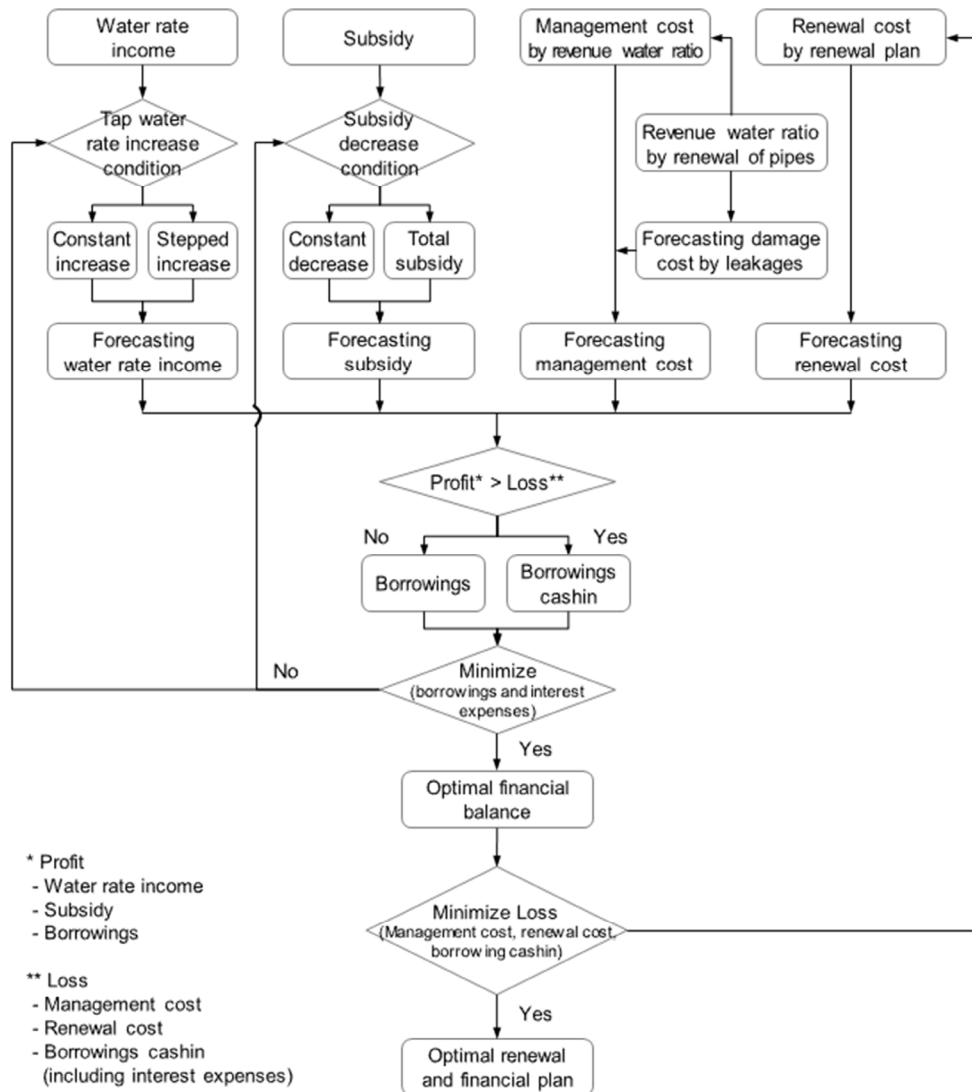


Fig. 1. Flow chart of the study.

장래 분석기간 동안 수도사업자의 수도요금 수익, 정부의 보조금 수익, 금융기관으로부터의 차입금 수익 등 수익부와 상수도시설물 자산을 가리키는 유형 자산 취득(개·대체)을 위한 지출, 시설물 유지관리에 소요되는 지출, 차입금의 상환 및 차입금 이자에 대한 지출 등 지출부를 종합적으로 고려하여, 재정 수지의 균형을 맞추기 위한 방법론을 개발하고, 실증연구를 통해 분석기간 동안 발생하는 총 비용이 최소가 되는 최적의 개량계획을 제안함으로써, 정책 결정자 측면에서 예산계획의 신뢰성을 확보할 수 있고, 중장기적 관점에서 지방상수도 운영의 효율성을 증진시킬 수 있는 실증연구 결과를 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 수도사업자의 재정계획과 연계한 최적 개량계획 수립 모델 개발 방법

본 연구에서는 수도사업자의 장래 재정계획과 연계한 최적 개량계획이란 연간 유형자산 취득(개·대체)을 위해 사용할 수 있는 예산 조건 하에서 유지관리비용, 개량비용(유형자산 취득(개·대체) 비용), 차입금 상환액, 누수로 인한 피해비용의 총합이 최소가 되는 계획으로 정의하였다. 여기서, 장래 재정계획은 수도요금과 국고보조금을 조정하며 재정 수지상 손실이 발생하지 않는 계획이 수립될 수 있도록 하였다. 수도사업

자의 장래 재정계획과 연계한 최적의 개량계획을 수립하기 위한 모델의 흐름도는 다음 Fig 1과 같으며, 세부 연구방법은 하위 절에 나타내었다.

2.1.1 재정 수지 항목의 선정 및 예측 방법

수도사업자의 재정 수지는 지방공기업 결산지침에 의거하여 크게 수익부와 지출부로 나눌 수 있다. 구체적으로 수익부는 급수수익, 급수공사수익, 기타영업수익, 이자수익, 기타영업외수익, 타회계보조금, 국고보조금, 금융기관차입금, 기금, 시설분담금, 지자체부담금, 기타로 구분할 수 있다. 지출부는 인건비, 유지관리비, 충당부채, 지급이자, 감가상각비, 기타영업외비용, 유형자산취득, 무형자산취득, 비가동설비취득, 투자자산취득, 차입금상환금, 기타로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 재정 계획 수립시 반드시 고려해야하고 영향이 큰, 수익부 항목으로 급수수익, 국고보조금, 금융기관차입금의 3가지 항목을, 지출부 항목으로 유지관리비, 유형자산취득, 차입금상환금(차입금에 대한 이자 포함)의 3가지 항목을 고려하고자 하였다. 그 외의 항목들은 발생하는 경우가 상당히 적으며, 장래에도 현재 수준과 유사한 수준으로 간주할 수 있는 항목이기에 고려하지 않았다.

고려한 6가지 항목(급수수익, 국고보조금, 금융기관차입금, 유지관리비, 유형자산취득, 차입금상환금(차입금에 대한 이자 포함))의 장래 예측은 각각 Equation 1~ Equation 7과 같은 방법에 의해 도출하였다.

Equation 1은 연차별 급수수익을 예측하기 위한 식을 나타낸다. 급수수익은 상수도 사용료 수익으로 실제 소비자한테 공급한 공급량에 수도물 요금단가를 곱해서 사용한다. 본 연구에서 적용한 공급량은 연구대상지역 수도정비기본계획의 생산량 예측 값에 유수율을 곱해서 산정하였다. 유수율의 경우 현재 연구대상지역의 유수율을 기준으로 적용하였으며, 개량이 필요한 관로를 개량하지 않아 노후관로의 비율이 증가하는 경우 유수율이 감소하는 것으로 가정하였다. 여기서 유수율 감소분은 연구대상지역에 투자된 비용을 통해 증가한 유수율과 감소한 노후관로의 비율 사이에서 도출한 관계식을 통해 도출하였다. 수도물 요금단가는 MOE (2016b)에 나타나있는 연구대상지역의 요금단가를 기준으로, 장래에는 기본적으로 매년 물가상승률 만큼 수도물 요금단가가 증가한다는 전제를 하였다. 추가적으로 어느 정도의 요금단가 상승이 필요한지를 주요

변수로 선정하여 결과 값을 도출하였다.

Equation 2는 연차별 국고보조금을 예측하기 위한 식을 나타낸다. 국고보조금은 상환하지 않아도 되는 비용에 해당하며, 수도사업자의 재정자립도를 고려하기 위해 기준 보조금에서 분석기간 동안 일정 금액만큼 감액하여 받는 경우와 총액에 대해서 제한조건을 주는 경우로 고려하였다.

Equation 3은 연차별 금융기관차입금을 예측하기 위한 식을 나타낸다. 분석기간 동안 급수수익, 보조금에 의한 수입에서 유지관리비 및 유형자산취득에 의한 지출을 제하였을 때 부족액이 발생하면, 부족액을 차입하는 것으로 가정하였다.

Equation 4는 연차별 유지관리비를 예측하기 위한 식을 나타낸다. 유지관리비는 Kim et al (2017)이 제안한 상수도 관망 표준 유지관리비 식에 정수장 인력운영비를 추가적으로 고려하여 산정하였다. Equation 4에 포함되는 유수율의 경우 앞서 기술한 방식을 동일하게 적용하였다. 노후관로가 증가하게 되면, 유수율은 감소하게 되고, 누수율은 증가하게 된다. 누수율의 증가는 소비자에게 공급되는 수량 중 손실되는 수량이 증가함을 의미한다. 그러나 소비자에게 공급되어야 하는 공급량은 예측에 의해 정해진 값이므로, 추가로 생산해야하는 수량이 증가함을 의미한다. 이는 유지관리비용이 증가하는 것으로 간주할 수 있으므로, 증가시켜야하는 생산량에 수도요금 단가를 곱한 값을 추가의 유지관리비용으로 산정하였다.

Equation 5는 연차별 유형자산 취득에 소요되는 비용을 도출하기 위한 식을 나타낸다. 유형자산 취득의 경우 내용연수를 기준으로 개·대체를 수행하는 경우에 발생하는 공사비용을 통해 도출하였다.

Equation 6은 연차별 차입금 상환금을 예측하기 위한 식을 나타낸다. 차입금 상환은 차입금과 반대개념으로 급수수익, 국고보조금에 의한 수익에서 유지관리비, 유형자산취득에 의한 지출을 제하였을 때, 남은 금액을 차입금 상환 비용으로 하여, 차입금과 이자비용 만큼 발생한다고 고려하였다. Equation 7은 Equation 6의 차입금 상환시 고려할 이자를 도출하기 위한 식을 나타낸다.

$$\sum_{j=1}^m WRI_j = \tag{Equation 1}$$

$$\sum_{j=1}^m (Q_j \times RWR \times WR_j (1+r)^{j-1})$$

$$\sum_{j=1}^m S_j = \sum_{j=1}^m (m-j) \frac{S_0}{m-1} \tag{Equation 2}$$



$$B_j = \begin{cases} WRI_j + S_j - RC_j - MC_j & (\text{if } WRI_j + S_j - RC_j - MC_j < 0) \\ 0 & (\text{if } WRI_j + S_j - RC_j - MC_j > 0) \end{cases} \quad \text{[Equation 3]}$$

$$RC_K = AAC_K \times (1 + r)^{SR_K - 1} \quad \text{[Equation 4]}$$

$$\sum_{j=1}^m MC_j = \begin{aligned} & \sum_{j=1}^m \left[3,406.211 + (1.00 \times 10^{-5}) \right. \\ & \left. \times Y_{1j} + (56.832) \times Y_{2j} \right. \\ & \left. + (-7.543) \times Y_{3j} + (2.560) \right. \\ & \left. \times Y_{4j} + (310.556) \times Y_{5j} + Y_{6j} \right] \\ & + \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{Q_j \times RWR}{RWR} - \frac{Q_j \times RWR_0}{RWR_0} \right) \times WR_j \right] \end{aligned} \quad \text{[Equation 5]}$$

$$BC_j = \begin{cases} 0 & (\text{if } WRI_j + S_j - RC_j - MC_j < 0) \\ WRI_j + S_j - RC_j - MC_j & (\text{if } WRI_j + S_j - RC_j - MC_j > 0) \end{cases} \quad \text{[Equation 6]}$$

$$IE_j = \begin{cases} \left(\sum_{j=1}^j B_j - \sum_{j=1}^j BC_j \right) \times R, & \text{if } \sum_{j=1}^j B_j - \sum_{j=1}^j BC_j > 0 \\ 0, & \text{if } \sum_{j=1}^j B_j - \sum_{j=1}^j BC_j < 0 \end{cases} \quad \text{[Equation 7]}$$

- Where, WRI_j = water rate income in j year (KRW)
 Q_j = amount of water production in j year (m^3 /year)
 WR_j = water rate in j year (KRW/ m^3)
 S_0 = standard subsidy (KRW)
 S_j = subsidy in j year (KRW)
 B_j = borrowings in j year (KRW)
 RC_j = renewal cost in j year (KRW)
 MC_j = management cost in j year (KRW)
 RC_K = replacement cost for K asset (KRW)

- AAC_K = asset acquisition cost for K asset (KRW)
 SR_K = standard service life of K asset (yr)
 Y_{1j} = amount of revenue water in j year (m^3)
 Y_{2j} = revenue water ratio in j year (%)
 Y_{3j} = hydrant density in j year (hydrant/ km^2)
 Y_{4j} = pipeline ratio over 21 year-old in j year (%)
 Y_{5j} = unit cost of pipeline management in j year (1,000 KRW/m)
 Y_{6j} = purification plant personnel expenses (million KRW)
 BC_j = borrowings cashin in j year (KRW)
 RWR_0 = standard revenue water ratio (%)
 RWR = revenue water ratio (%)
 IE_j = interest expenses in j year (KRW)
 r = consumer prices inflation (%) (= 2.0 %)
 R = interest ratio (%) (= 5.5 %)
 m = analysis period (years) (=30 years)
 j = 1, 2, ..., m

2.1.2 최적 재정 계획의 수립 방법

우리나라의 상수도는 사회기반시설물로서 수익의 창출보다는, 공중 보건의 향상, 물 복지의 실현을 주 목적으로 하는 시설물이라 할 수 있다. 따라서 상수도사업에서의 최적 재정 수지란 수익과 지출이 균형을 맞추어, 사업의 지속가능성을 담보할 수 있는 것으로 정의할 수 있다. 본 연구에서 수도사업자의 재정계획은 선정된 재정수지 항목을 분석기간 동안 예측함으로써 수립하였다. 수도사업자가 상수도시설물 유형자산의 취득(개 대체)에 사용할 수 있는 예산의 범위 속에서 유형자산의 취득을 위해 지출을 하였을 때, 수도사업자의 수익과 지출의 합이 0에 수렴하여 재정수지가 균형을 이룰 수 있도록 수도요금 증가분과 보조금 조건을 조정 한 계획이 최적의 재정계획이라고 정의하였다.

수도사업자의 수익과 지출을 나타낸 Equation 1~ Equation 7에서 알 수 있듯이, 수익과 지출을 계산하기 위한 식들 중 일부는 비선형적인 특성을 나타내고 있다. 이와 같은 특성을 고려하여 본 연구에서는 비선형 계획법(non-linear programming)을 이용하여 수도사업자의 재정수지의 균형점을 도출하고자 하였다. 비선형 계획법은 선형 계획법(linear programming)과 같이 목적함수와 제약조건으로 모형이 구성되지만, 목적함수

와 제약조건이 1차식이 아닌 비선형함수로 표현되는 경우에 사용하는 수리계획법이다. 비선형계획법을 활용한 최적 재정계획수립 모델은 Microsoft사의 Excel에서 제공하는 Solver 기능을 이용하여 개발하였다. 비선형계획법의 목적함수를 달성하기 위한 주요 변수인 수도요금 변경조건과 국고보조금 조건이 도출될 수 있도록 모델을 구성하였다. 비선형계획법의 목적함수는 다음 Equation 8과 같이 차입금상환금(차입금과 이자의 합)의 최소화로 설정하였다.

Objective function = Minimize total borrowings and interest expenses

$$\text{Objective function} = \min \left[\left(\sum_{j=1}^m B_j - \sum_{j=1}^m BC_j \right) \times (1 + R) \right] \quad \text{[Equation 8]}$$

Where,

$$\sum_{j=1}^j B_j = \text{Borrowings until } j \text{ years (KRW)}$$

$$\sum_{j=1}^j BC_j = \text{Borrowings cashin until } j \text{ years (KRW)}$$

R = interest ratio (%)

재정 수지의 균형을 맞추기 위한 제약조건은 Equation 9~Equation 14와 같이 설정하였으며, Equation 9는 수도사업자의 재정 수지 예측 결과상 수익보다 지출이 많게 되는 경우를 방지하기 위해 설정한 조건으로, 목적함수가 비음조건임을 나타내는 제약조건이다.

Equation 10과 Equation 11은 수도요금 조건에 의한 제약 조건으로, Equation 10은 수도요금이 분석기간 동안 일정하게 증가하는 경우, Equation 11은 수도요금이 분석기간 동안 일정기간마다 단계적으로 증가하는 경우의 제약조건을 나타낸다. Equation 12는 증가해야 할 수도요금이 비음 조건임을 나타낸다.

Equation 13은 보조금 총액에 대한 조건을 나타내고, Equation 14는 보조금 총액에 대한 조건일 때 연도별 보조금이 기준 보조금 보다 작아야 함을 나타낸다.

$$\text{Objective function} > 0 \quad \text{[Equation 9]}$$

$$WR_j = WR_0 + jx \quad \text{[Equation 10]}$$

$$WR_j = WR_0 + x_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad \text{[Equation 11]}$$

$$x > 0, x_i > 0 \quad \text{[Equation 12]}$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^m S_j \leq \frac{S_0 \times m}{2} \quad \text{[Equation 13]}$$

$$0 \leq S_j \leq S_0 \quad \text{[Equation 14]}$$

2.1.3 최적 개량계획의 수립 방법

최적 개량계획의 수립을 위하여 수도사업자가 유형자산의 취득을 위해 수도사업자가 연간 사용할 수 있는 예산의 범위를 조정하면서, 지출비용(유지관리비, 유형자산취득금액, 차입금상환금)의 합이 최소가 되는 조건을 도출하였다. 분석기간 동안 지출비용의 합이 최소가 되는 예산 사용 범위에서 수립된 개량계획을 최적의 개량계획으로 정의하였으며, 개량계획에 맞는 최적 재정계획의 수립을 위하여 증가시켜야 하는 수도요금과 국고보조금 조건을 도출하였다.

2.2 개발모델의 실증 연구

2.2.1 연구대상지역의 선정 및 연구대상지역 자료의 수집

개발한 모델은 상수도시설의 자산현황이 파악된 Y군 Y정수장계통 급수구역에 적용하였다. Y군 Y정수장계통 급수구역은 Y정수장에서 상수를 공급하고 있으며, Y정수장의 일평균 공급량은 8,303 m³/d이며, Y정수장의 시설용량이 13,500 m³/d인 것을 고려하였을 때, 61.5 %의 이용률로 운영중인 것으로 나타났다.

연구대상지역의 자산현황 데이터는 MOE (2016a)에 의해 수행된 연구대상지역의 상세조사 결과를 활용하였다. 연구대상지역은 110 개의 정수자산, 1,067 개의 관로자산으로 구성되어 있으며, 상세조사를 통해 조사된 자산의 취득원가, 취득연도, 관경, 관중 등의 데이터를 토대로 개량계획을 모델링 하였다.

2.2.2 시나리오의 설정

본 연구에서는 수도사업자가 재정 여건을 고려한 개량계획을 수립할 시 여러 가지 상황을 고려할 수 있게 시나리오를 Table 1과 같이 설정하였다. 시나리오는 수도요금 조건과 국고보조금 조건을 기준으로 설정하였으며, 수도요금 조건은 분석기간 동안 일정하게 증가하는 경우, 분석기간 동안 5년마다 단계적으로 증가하는 경우로 구분하였으며, 국고보조금 조건은 분석기간 동안 일정하게



Table 1. Explanation of scenario

Scenario	Water rate condition	Subsidy condition
CICD	Constant Increase	Constant Decrease
CITS	Constant Increase	Total Subsidy
SICD	Stepped Increase	Constant Decrease
SITS	Stepped Increase	Total Subsidy

Table 2. Water rate and subsidy of study area

Study area	Unit water rate	Standard subsidy
Y city	1,086(KRW/m ³)	1,500(million KRW)

감소하는 경우, 분석기간 동안 과거 5년 동안 연평균 국고보조금을 30년 동안 지급받을 시 받게 되는 국고보조금 총액을 총 지출의 합이 최소가 되도록 지급받는 경우로 구분하였다. 또한, 연구대상지역의 수도요금 및 보조금 현황 조사를 통해 시나리오에 적용하기 위해 사용되는 수도요금 기본 조건과 보조금 기본 조건을 Table 2에 나타내었다.

3. 연구결과

3.1 연구대상지역의 시나리오별 최적 재정계획 수립 결과

분석의 대상이 된 연구대상지역의 자산 중 최대 내용연수를 갖는 자산의 내용연수가 30년임을 고려하고, 수도사업자의 연간 유형자산 취득을 위해 사용가능한 예산의 범위 내에서 향후 30년간의 재정계획을 수립하였다. 여기서, 사용가능한 예산의 범위로 인하여 분석기간이 30년이 지난 이후에 개량이 수행되는 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 경우가 발생한다면, 동일한 조건에서 시나리오를 분석할 수 없기 때문에, 연간 사용가능한 예산의 범위는 개량 물량이 이월되지 않는 선으로 설정하였다.

시나리오 CICD(수도요금의 일정한 증가 및 국고보

조금의 일정한 감소 조건)의 재정 계획을 수립한 결과는 Table 3과 같다.

연간 사용가능한 예산 범위가 작을수록 개량을 해야 할 물량이 특정 기간에 몰리지 않고, 평준화되기 때문에 일시에 큰 비용을 차입하지 않아도 된다. 따라서 차입금과 이자비용에 대한 차입금 상환비용은 연간 사용가능한 예산 범위가 작을수록 작게 나타났다.

반면, 연간 사용가능한 예산 범위가 작을수록 개량물량이 이월되어 물가상승률에 의해 증가되는 부분만큼 유형자산 취득 비용(개대체 비용)이 증가하는 것으로 나타났으며, 적정 시기에 개량이 이루어지지 못함에 따라 유수율 저하로 인한 유지관리비용이 증가되는 것으로 나타났다.

다음 Table 4는 시나리오 CITS(수도요금의 일정한 증가 및 국고보조금 총액 조건)의 재정 계획을 수립한 결과를 나타낸다.

시나리오 CICD와 마찬가지로 시나리오 CITS에서도 연간 사용가능한 예산 범위가 작을수록 차입금 상환비용은 감소하였으며, 유형자산 취득 비용(개량비용)과 유지관리비용은 증가하는 것으로 나타났다. 시나리오 CICD와 시나리오 CITS의 차이점은 국고보조금의 연차별 투입 조건이 다름에 따라 수도요금 수입상 차이가 발생하였다는 점이다. 국고보조금을 일정하게 감소시키는 시나리오에 비해 30년 동안 국고보조금 지원 총액을 정한 상태에서 연차별로 상황에 맞게 국고보조금 지원금액을 사용하는 시나리오가 소비자 입장에서 수도요금 인상분이 적은 시나리오라는 결과가 도출되었다.

다음 Table 5는 시나리오 SICD(수도요금의 단계적 증가 및 국고보조금의 일정한 감소 조건)의 재정 계획을 수립한 결과를 나타낸다.

시나리오 SICD의 경우 분석기간 동안 5년마다 수도요금을 단계별로 증가시키는 시나리오이다. 국고보조금

Table 3. Result of financial profit and loss for scenario CICD

Category	Annul limited budget for renewing waterworks (million KRW)								
	3,000	2,800	2,600	2,400	2,200	2,000	1,800	1,600	1,569
Water rate income	207,723	208,299	209,000	210,470	211,479	213,386	215,420	218,795	220,903
Subsidy	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500
Borrowings	11,707	11,353	10,423	9,382	8,925	8,360	7,905	6,770	6,885
Total profit	241,931	242,152	241,923	242,353	242,904	244,246	245,825	248,065	250,289
Management cost	181,464	181,969	182,659	183,922	184,824	186,547	188,299	191,344	193,105
Renewal cost	41,723	41,758	41,868	41,941	42,028	42,214	42,327	42,636	42,690
Borrowings cashin	18,744	18,425	17,397	16,490	16,053	15,486	15,198	14,086	14,493
Total loss	241,931	242,152	241,923	242,353	242,904	244,246	245,825	248,065	250,289

pp. 125-139

pp. 141+148

pp. 149-159

pp. 161-168

pp. 169-175

pp. 177-186

Table 4. Result of financial profit and loss for scenario CITS

Category	Annul limited budget for renewing waterworks (million KRW)								
	3,000	2,800	2,600	2,400	2,200	2,000	1,800	1,600	1,569
Water rate income	205,291	205,867	206,568	208,038	209,046	210,954	212,987	216,362	218,471
Subsidy	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500
Borrowings	13,835	13,464	12,348	11,071	10,367	8,454	7,570	6,282	6,227
Total profit	241,626	241,830	241,416	241,609	241,913	241,908	243,057	245,145	247,198
Management cost	181,464	181,969	182,659	183,922	184,824	186,547	188,299	191,344	193,105
Renewal cost	41,723	41,758	41,868	41,941	42,028	42,214	42,327	42,636	42,690
Borrowings cashin	18,439	18,103	16,889	15,746	15,061	13,148	12,431	11,166	11,402
Total loss	241,626	241,830	241,416	241,609	241,913	241,908	243,057	245,145	247,198

Table 5. Result of financial profit and loss for scenario SICD

Category	Annul limited budget for renewing waterworks (million KRW)								
	3,000	2,800	2,600	2,400	2,200	2,000	1,800	1,600	1,569
Water rate income	203,669	204,226	204,904	206,326	207,305	209,155	211,127	214,401	216,446
Subsidy	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500
Borrowings	11,761	11,397	10,158	9,303	8,385	7,229	5,994	4,241	4,406
Total profit	237,931	238,123	237,922	238,129	238,189	238,884	239,622	241,142	243,352
Management cost	181,464	181,969	182,659	183,922	184,824	186,547	188,299	191,344	193,105
Renewal cost	41,723	41,758	41,868	41,941	42,028	42,214	42,327	42,636	42,690
Borrowings cashin	14,744	14,396	13,396	12,266	11,338	10,123	8,995	7,163	7,557
Total loss	237,931	238,123	237,922	238,129	238,189	238,884	239,622	241,142	243,352

Table 6. Result of financial profit and loss for scenario SITS

Category	Annul limited budget for renewing waterworks (million KRW)								
	3,000	2,800	2,600	2,400	2,200	2,000	1,800	1,600	1,569
Water rate income	202,132	202,649	203,292	204,610	205,526	207,288	209,129	212,290	214,247
Subsidy	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500
Borrowings	13,537	13,173	12,143	11,167	10,160	8,666	7,180	5,057	4,879
Total profit	238,169	238,322	237,935	238,277	238,186	238,454	238,809	239,847	241,626
Management cost	181,464	181,969	182,659	183,922	184,824	186,547	188,299	191,344	193,105
Renewal cost	41,723	41,758	41,868	41,941	42,028	42,214	42,327	42,636	42,690
Borrowings cashin	14,982	14,595	13,409	12,414	11,334	9,693	8,182	5,868	5,831
Total loss	238,169	238,322	237,935	238,277	238,186	238,454	238,809	239,847	241,626

조건이 동일한 시나리오 CICD와 비교한 결과, 연간 사용 가능한 예산의 범위가 동일한 조건에서, 수도요금 수익은 시나리오 CICD가 더 높게 나타났다. 이는 시나리오 CICD가 시나리오 SICD에 비해 더 많은 수도요금 증가가 필요하다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 설정한 차입금 발생조건을 통해 해석할 수 있다. 본 연구에서는 수익과 지출을 비교하여 지출이 수익보다 큰 연차에 차입금이 발생하는 것으로 전제하였다. 수도요금을 5년마다 단계별로 증가시키는 경우, 수도요금을 증가시키기 직전 연도에 필요로 하는 지출이 수익보다 큰 경우의 발생이

많아 차입금의 발생이 많은 것으로 나타났다. 수도요금을 증가시키지 못하여 발생한 손실을 차입금을 통해 채워야 하는 것으로 이해할 수 있다. 수도사업자의 관점에서는 차입금 발생은 수도경영에 어려움으로 작용할 수 있으나, 소비자의 관점에서는 수도요금 인상 폭이 적어지므로 시나리오 SICD는 시나리오 CICD에 비해 소비자의 입장에서 최적의 시나리오라 할 수 있다.

다음 Table 6은 시나리오 SITS(수도요금의 단계적 증가 및 국고보조금 총액 조건)의 재정 계획을 수립한 결과를 나타낸다.



시나리오 SICD와 시나리오 SITS를 비교한 결과 국고보조금의 연차별 투입조건이 다름에 따라 수도요금 수익에 차이가 발생하며, 이에 따라 차입금 발생 조건 역시 달라진다는 결과가 나타났다. 차입금의 경우 시나리오 SITS가 시나리오 SICD에 비해 더 많이 발생하는 것으로 나타났다.

분석한 4가지 시나리오의 결과에서 알 수 있듯이 모든 시나리오의 총 수익과 총 지출의 합은 “0”으로, 수도사업자가 향후 30년 동안 수도사업을 지속할 수 있다는 결과가 도출되었다. 각각의 재정계획은 설정한 조건별로 모두 최적의 재정계획이라 할 수 있다.

3.2 연구대상지역의 최적 개량계획 수립 결과

본 연구의 주 목적인 최적 개량계획을 도출하기 위해 앞서 설정한 시나리오에 따른 최적 재정계획을 도출하였다. 본 절에서는 최적의 재정계획을 만족함과

동시에 소요되는 비용이 최소가 되는 최적의 개량계획을 수립한 결과를 나타낸다.

다음 Fig 2는 연간 사용가능한 예산 범위에 따라 소요되는 비용(유지관리비, 유형자산 취득 금액, 차입금 상환금)을 나타내며, Fig 2에서 알 수 있듯이, 연간 사용가능한 예산의 범위가 26억 원인 조건에서 모든 시나리오에서 소요되는 비용이 최소가 되었다.

전반적으로 수도요금을 일정하게 증가시키는 시나리오 보다 단계별로 증가시키는 시나리오에서 소요되는 비용이 적게 도출되었으며, 국고보조금의 경우 국고보조금을 연차별 상황에 맞게 집행하는 것이 수도요금 증가분이 적게 나타났다. 비용적인 측면에서 연간 사용가능한 예산범위가 26억 원인 조건에서 수립된 개량계획이 최적의 개량계획이라 할 수 있으며, 다음 Table 7은 연간 사용가능한 예산범위가 26억 원인 조건에서 재정수지의 균등화를 위해 증가시켜야 할 수도요금을 나타낸다.

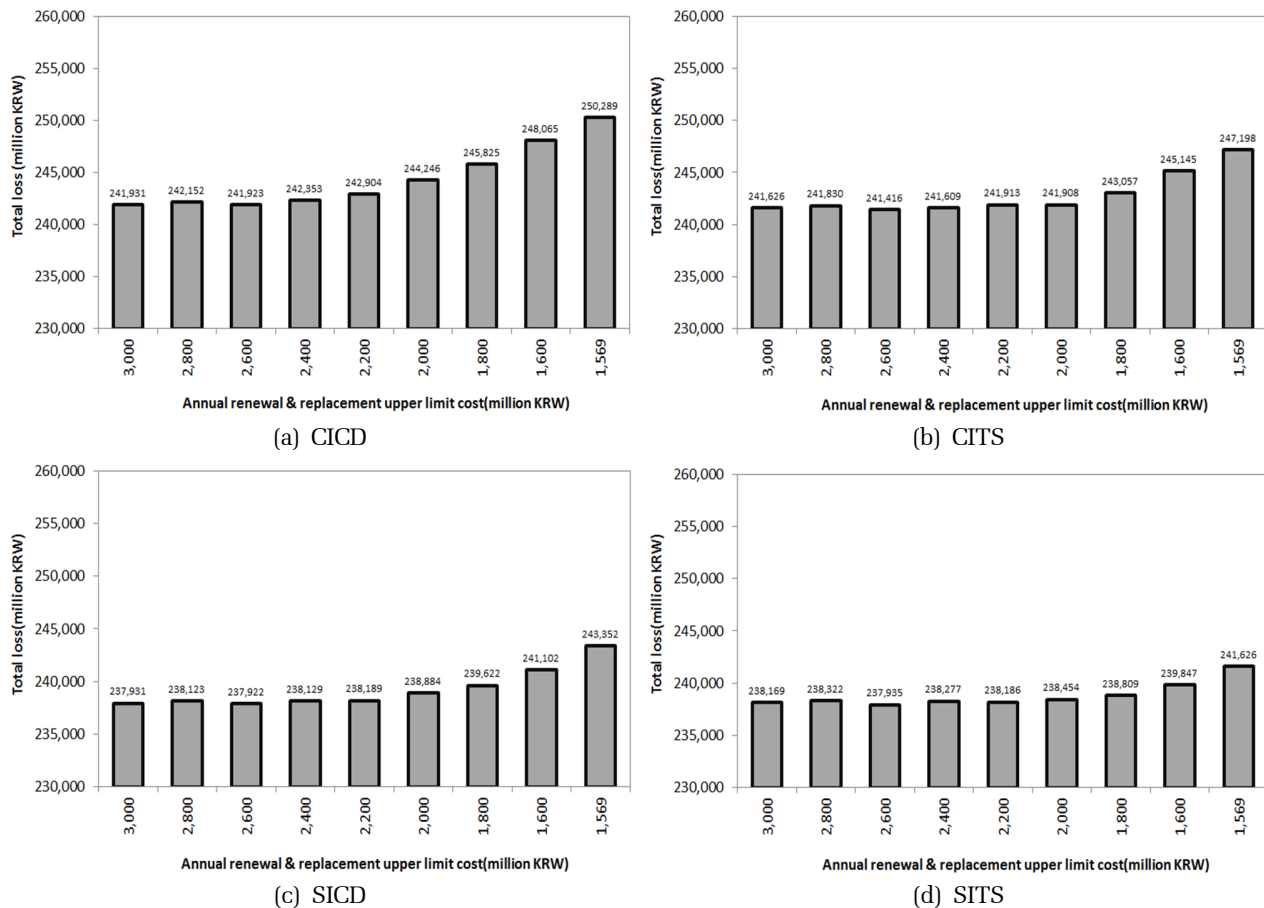


Fig. 2. Total cost of scenarios.

Table 7. Result of tap water rate which need to be increased

Scenario	Scenario			
	CICD	CITS	SICD	SITS
Current tap water rate(KRW/m ³)	1,086			
Increased tap water rate (KRW/m ³ /year for CICD, CITS, KRW/m ³ /5year for SICD, SITS)	38.82	37.21	291.04	286.32
tap water rate (last year of analysis) (KRW/m ³)	3,235.56	3,187.41	2,832.22	2,803.93

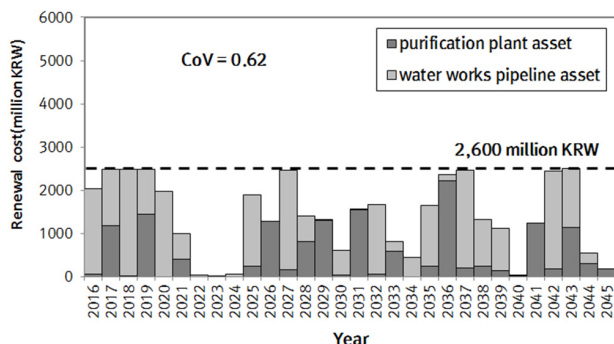


Fig. 3. Optimal renewal schedule of study area.

다음 Fig 3은 연간 사용가능한 예산범위가 26억 원인 조건에서 도출한 최적 개량계획을 나타낸다.

결론적으로 본 연구에서 개발한 모델을 Y군에 실증 적용한 결과 연간 26억 원의 예산 투자 범위 내에서, 수도요금을 연차별로 일정하게 증가시키는 시나리오는 수도요금을 37.21원/m³~38.82원/m³ 상승시키고, 수도요금을 5년 주기로 계단식으로 증가시키는 시나리오인 수도요금을 286.32원/m³~291.04원/m³ 상승시킨다면, 수도사업자의 수익과 지출이 균형을 이루는 투자가 이루어질 수 있을 것이라는 결과가 도출되었다.

수도사업자의 관점에서는 총 지출이 237,922백만 원으로 최소가 되는 조건(시나리오 SICD)가 최적의 개량 투자 계획이라 할 수 있으나, 소비자의 관점에서는 수도요금의 증가가 최소가 되는 조건(시나리오 SITS)가 최적의 개량 투자 계획이라 할 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시한 실증 연구의 결과는 향후 다양한 시나리오의 설정을 통해 수도사업자에게 최적임과 동시에 소비자에게도 최적인 결과를 도출할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지방상수도 수도사업자의 재정계획과 연계한 최적 개량계획을 수립하기 위하여 6가지

재정수지 항목(수입부: 급수수익, 국고보조금, 차입금, 지출부 : 유지관리비, 유형자산취득, 차입금상환금)을 고려하여 비선형계획법에 적용하고, 발생하는 비용이 최소가 되는 최적 개량계획 최적화 모델을 개발하였다.

Y군을 대상으로 실증 연구를 수행한 결과 Y군의 경우 연간 사용가능한 예산이 26억 원인 범위 내에서 개량계획을 수립하는 것이 가장 최적의 개량계획임을 도출하였다. 연간 26억 원의 투자 범위 내에서 수도사업자 관점에서는 총 비용이 최소가 되는 시나리오 SICD, 소비자 관점에서는 수도요금 증가가 최소가 되는 시나리오 SITS를 최적의 개량 투자 계획이라 하였다.

개발한 모델은 여러 가지 시나리오 조건에 따라 가장 합리적인 결과를 도출할 수 있는 것으로 나타났으며, 향후 연구 대상지역의 특성, 수도사업자의 목표 등을 종합적으로 고려하여 최적 재정 수지 및 개량계획 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 제안한 방법은 상수도시설 자산관리의 마지막 단계인 최적 재정 계획 및 개량 계획의 핵심 부분이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법을 통해 지방상수도 수도사업자는 각 상황에 맞게 활용하여 상수도시설의 자산관리에 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업(2016 002120006)” 으로부터 지원받았습니다.

References

Dandy, G. C., and Engelhardt, M. (2001). Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127 (4), 214-223.

Dridi, L., Parizeau, M., Mailhot, A., and Villeneuve, J. P. (2008).



- Using Evolutionary Optimization Techniques for Scheduling Water Pipe Renewal Considering a Short Planning Horizon, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23, 625-635.
- Hong, H. P., Allouche, E. N., and Trivedi, M. (2006). Optimal Scheduling of Replacement and Rehabilitation of Water Distribution Systems. *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, 12 (3), 184-191.
- IPWEA, (2015), IIMM(International Infrastructure Management Manual) international 5th edition 2015, IPWEA, p.372.
- Kim, K., Kim, C., Shin, H., Seo, J., Hyung, J., and Koo, J. (2017). The developing optimum maintenance cost model for water pipe network by waterworks business characteristics, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 31 (1), 51-62.
- Kim, K. (2015), The optimal renewal planning using dynamic programming in water pipelines, Master's Thesis, University of Seoul, p.193.
- Kleiner, Y., Nafi, A., and Rajani, B. (2010), Planning renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastructure, *Water Science and Technology: Water Supply*, 10 (6), 897-906.
- Kleiner, Y. (2001). Scheduling Inspection and Renewal of Large Infrastructure Assets, *Journal of Infrastructure Systems*, 7 (4), 136-143.
- MOE(Korea Ministry of Environment), (2016a), Developing Integrated System for the Operation and Asset Management of Waterworks Facilities - 2nd year, MOE, p.240.
- MOE(Korea Ministry of Environment), (2016b). 2014 Statistics of waterworks, MOE.
- MOE(Korea Ministry of Environment), (2015). Status assessment and feasibility study for maintenance project of aged local waterworks, MOE.
- Shin, H., Joo, C., and Koo, J. (2016). Optimal rehabilitation model for water pipeline systems with genetic algorithm, *Procedia Engineering*, 154, 384-390.
- US EPA(United States Environmental Protection Agency), (2012). Fundamental of asset management session 0 - Executive overview, <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/asset-management-workshops-training-slides> (accessed 15 January 2017).

pp. 125-139

pp. 141+148

pp. 149-159

pp. 161-168

pp. 169-175

pp. 177-186