



수도사업자의 경영환경을 고려한 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델 개발 연구

The developing optimum maintenance cost model for water pipe network by waterworks business characteristics

김기범¹·김창환²·신희수¹·서지원¹·형진석¹·구자용^{1*}

Kibum Kim¹·Changhwan Kim²·Hwisu Shin¹·Jeewon Seo¹·Jinseok Hyung¹·Jayong Koo^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학과, ²(주)삼안

¹Environmental Engineering, University of Seoul, ²Saman

ABSTRACT

For the asset management of a water pipe network, it would be necessary to understand the extent of the maintenance cost required for the water pipe network for the future. This study would develop a method to draw the optimum cost required for the maintenance of the water pipe network in waterworks facilities to maintain the aim revenue water ratio and to achieve the target revenue water ratio, considering the water service providers' waterworks condition and revenue water ratio comprehensively. This study conducted a survey with 96 water service providers as of the early 2015 and developed models to estimate the optimum maintenance cost of the water pipe network, considering the characteristics of the water service providers. Since the correlation coefficient of all the developed models was higher than 0.95, it turned out that it had significant reliability, which was statistically significant. As a result of applying the developed models to the actual water service providers, it was drawn that increasing revenue water ratio to more than a certain level can reduce the maintenance cost of the water pipe network by a great deal. In other words, it is judged that it would be the most efficient to secure the reliability of waterworks management by increasing the short-term revenue water ratio to more than a certain level and gradually increase the revenue water ratio from the long-term perspective. It is expected that the proposed methodology proposed in this study and the results of the study will be used as a basic research for planning the maintenance of water pipe network or establishing a plan for waterworks facilities asset management.

Key words: Optimum maintenance cost, Revenue water ratio, Water pipe network maintenance, Waterworks characteristics.

주제어: 상수도관망 유지관리, 수도사업자 수도여건, 유수율, 적정 유지관리비용

1. 서 론

우리나라의 상수도는 1908년 뚝도정수장의 급수개시 이후 100년이 넘는 기간동안 지속적으로 발전해왔다. 2014년에는 상수도보급률 98.6 %를 달성하였으며,

상수도관망의 경우도 190,901 km가 매설되어 있는 등 이제는 우리나라도 상수도의 양적인 부분에서는 상수도 선진국이라 일컬을 수 있게 되었다. 우리나라의 상수도는 국가주도의 집중적인 시설투자가 이루어졌다. 집중적인 투자로 우리나라의 상수도는 고도 경제성장과 발맞추어 급격한 양적 확대를 이루었고, 우리나라의 발전에 일조하였다.

Received 23 January 2017, revised 3 February 2017, accepted 6 February 2017

*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

그러나 상수도관망에 대한 투자 저조 및 유지관리의 미흡으로 인하여 생산된 6,214백만 m^3 의 수도물 중 11.1%인 691백만 m^3 이 누수로 손실되고 있으며, 수도사업자별 누수량과 생산원가를 고려하여 산출한 누수로 인한 손실액은 연간 7,138억 원에 달하고 있다. 또한 노후 상수도관로의 비율은 점진적으로 증가하고 있는 실정이다. 2014년 말 현재, 지방공기업법 시행규칙 상에 나타나 있는 상수도관의 내용연수 30년을 기준으로 향후 10년 이내에 내용연수를 초과할 것으로 예상되는 상수도관로의 길이는 전체 관로 중 31.23%에 달하고 있다(MOE(Ministry of Environment), 2015). 즉, 31.23%의 상수도관은 향후 10년 이내에 전량 교체되어야 한다. 노후관로의 증가는 생산원가의 상승을 야기하며, 생산원가의 상승은 결과적으로 시설 투자여력의 감소로 이어진다. 따라서 우리나라 정부는 향후 상수도관망에 지원금을 지원하려고 계획을 수립하고, 영세한 수도사업자의 자생력을 높이기 위한 노력을 기울이고 있다.

비용이 투입되어 사업이 완료되더라도 지속적으로 목표 유수율을 유지하면서 안정적으로 수도시설을 유지관리하기 위해서는 상수도관망에 대한 체계적인 시설 유지관리 및 시설물 자산관리를 실시할 필요가 있다. 그리고 상수도관망에 대한 체계적인 유지관리 및 자산관리를 위해서는 장래에 상수도관망에 대해 소요될 유지관리비용이 어느정도인지 파악할 필요가 있다. 또한 상수도관망에 대해 소요될 유지관리비용은 수도사업자의 경영환경이라 할 수 있는 수도여건과 유수율에 따라 산정될 필요가 있다. 수도사업자의 경영환경은 상수도관망의 유지관리비를 변동시키는 주요 요인이기 때문이다.

간접적인 방법으로 상수도관망의 유지관리비용을 산정한 연구들은 다수 존재한다. 관련 연구들은 대부분 상수도관로의 생애주기비용을 도출하기 위해 유지관리비용을 산정하였다(Shamir and Howard, 1979; Walski and Pelliccia, 1982; Kleiner et al, 2001; Dandy and Engelhardt, 2006; Shin, 2012; Kim, 2015). 그러나 해당연구들은 상수도관망에 소요되는 유지관리비용을 명확하게 산출하지 못하고, 대부분 파손율을 기반한 유지관리비용을 적용하고 있다. Shamir and Howard(1979)와 Walski and Pelliccia(1982), Kleiner et al(2001)은 지수 형태의 파손율 모델을 활용하여 관 파손에 따른 보수 비용을 유지관리비용으로 간주하였

다. Dandy and Engelhardt(2006)은 갱생비용을 유지관리비용으로써 활용하였으며, Shin(2012)과 Kim(2015)은 각각 누수형 모델, cohort survival model의 failure function을 이용하여 도출한 파손율과 파손 발생 건당 보수비용을 유지관리비용으로 간주하였다. 즉, 수도사업자의 특성에 적절한 유지관리비 또는 유지관리비 원단위를 적용하지 못했다는 한계점들을 갖고 있다.

직접적으로 상수도관망의 유지관리비와 수도사업자의 수도여건 및 유수율 사이의 관계를 조명한 연구로는 Kim et al (2012)의 연구가 있다. Kim et al (2012)은 40개 수도사업자를 대상으로 상수도관망의 유수율과 유지관리비용의 관계식을 지수형태로 도출한 뒤 군집화한 전국 지자체에 관계식을 적용하였다. 전국 지자체의 군집화에는 인구, 유수율, 배수관길이, 평균경사도 등의 인자를 고려하였다. 그러나 자료의 한계로 인하여 많은 수의 표본을 확보하지 못한 부분, 상수도관망의 유지관리비에 영향을 주는 다양한 요인 중 일부만을 고려하였다는 부분이 연구의 한계점으로 지적되고 있다.

한편, KECO(Korea Environment Corporation)(2010)은 상수도관망 최적관리시스템 구축사업을 진행하며, 향후 30년동안 Y군에서 상수도관망의 유지관리를 위해서 소요될 비용을 산정한 바 있다. 그러나 도출된 결과는 산간지역에 위치한 Y군의 수도여건에 최적화된 결과이므로, 비용을 산정하기 위한 방법론 및 결과는 전국을 대표할 수 있는 결과라기보다는 대상지역에 국한된 결과라 할 수 있다.

결론적으로 현재까지 수도사업자의 경영환경(수도여건 및 유수율 등)과 상수도관망 유지관리비 사이의 관계를 직접적으로 규명한 연구는 부족한 실정이며, 이에 따라 장래 상수도 재정계획의 수립은 공학적이지만 방법론으로 수립되고 있다. 그러므로 효율적인 상수도관망의 관리를 위해서는 수도사업자의 경영환경에 따른 적정 상수도관망 유지관리비용을 산출할 필요성이 강조되고 있다.

따라서 본 연구에서는 수도사업자의 경영환경을 종합적으로 고려하여 적정 유수율의 유지 및 목표 유수율의 달성을 위하여 상수도관망의 유지관리를 위해 소요되어야 하는 적정 비용을 도출하고자 하였다. 이를 위해 2015년 초를 기준으로 96개 수도사업자에 대한 조사를 실시하였으며, 수도사업자의 경영환경을 고려한 상수도관망 적정 유지관리비를 산정하기 위한



모델을 개발하였다. 또한, 개발한 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델의 실증 연구를 통하여, 향후 우리나라 상수도관망의 유지관리계획, 자산관리계획 수립 시 활용할 수 있는 방안을 제안하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델 개발

상수도관망의 유지관리비에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하다. 본 연구에서는 상수도관망의 유지관리비에 영향을 미칠 것으로 판단되는 수도사업자의 특성과 상수도관망에 대해 실제 지출된 유지관리비를 조사하였다. 조사 결과를 바탕으로 유수율에 따른 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델을 개발한 뒤 1개 지방상수도 사업자를 대상으로 모델을 적용하여 실증연구를 수행하였다. 본 연구의 연구흐름도는 Fig. 1과 같다.

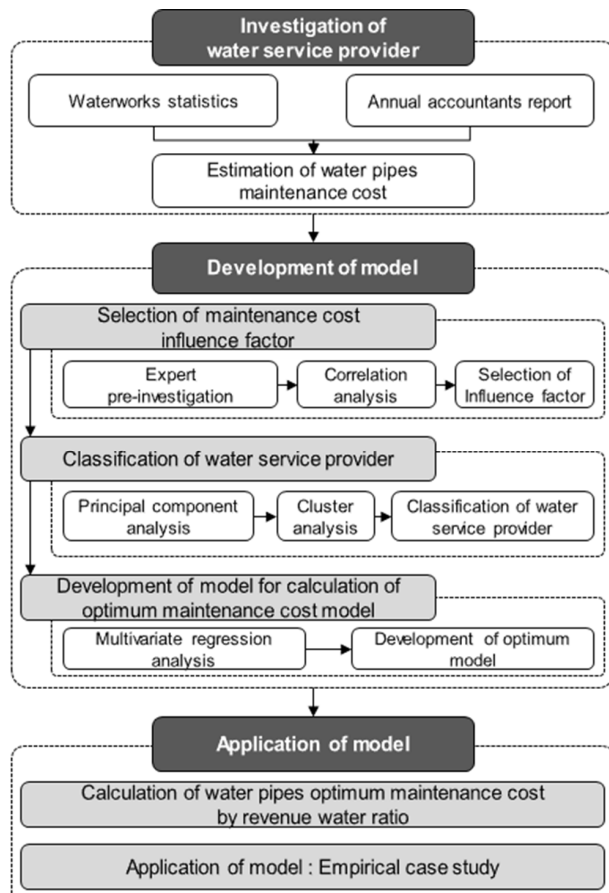


Fig. 1. Flow chart of this study.

2.1.1 수도사업자 상수도관망 유지관리비 조사

본 연구에서는 공기업특별회계로 관리되고 있는 116개 상수도 지방공기업 중 최근 정부규모의 대단위 관망관리사업이 실시된 태백권 4개 도시의 수도사업자, 제주특별자치도 수도사업자, 최근 특별자치시로 승격되어 장기간의 통계자료 구축이 미미한 세종시 수도사업자, 광역으로부터의 원정수 수수율이 100%인 수도사업자를 제외한 96개의 상수도 지방공기업을 조사 대상으로 선정하였다.

지방공기업 결산 자료상 영업비용은 인력운영비, 동력비, 약품비, 원정수구입비, 수선교체비, 감가상각비, 민간위탁비, 연구개발비, 경상이전, 일반운영비, 퇴직급여충당금전입금, 기타영업비용로 구분할 수 있으며, 정수시설과 상수도관망을 포함한 모든 상수도시설에 대한 비용이 나타나있다. 상수도관망의 유지관리비는 지방공기업 결산 자료에 나타나 있는 전체 영업비용 중 상수도관망의 유지관리에 사용한 비용만을 구분하여 산정하였다. 인력운영비의 경우, 정수시설 관리업무를 위해 배치된 인력과 상수도관망 관리업무를 위해 배치된 인력을 구분하였으며, 구분을 위하여 수도사업자 조사를 실시하였다. 수선교체비와 일반운영비의 경우 결산 내역을 검토하여, 상수도관망의 수선교체비 및 일반운영비로 활용된 비용만을 구분하여 적용하였다. 동력비의 경우 대다수의 동력비가 상수도관망의 운영을 위해 사용되는 비용임을 고려하여 본 연구에서는 동력비가 100% 상수도관망에 투입된다고 가정하였다. 한편, 약품비, 원정수구입비의 경우 정수장의 운영을 위해 사용되는 비용이고, 감가상각비, 경상이전비, 퇴직급여충당금전입금, 기타영업비의 경우 회계처리의 목적을 갖는 비용항목이라 할 수 있다. 또한 민간위탁비, 연구개발비 역시 상수도관망의 유지관리를 위해 사용되는 비용이라 할 수 없으므로 해당 비용은 고려하지 않았다.

2.1.2 상수도관망 유지관리비 영향 요인 조사

상수도관망 유지관리비와 밀접한 관련이 있을 것으로 추정되는 총 31가지의 인자를 사전 전문가 조사를 통해 선정하였으며, 선정된 인자들은 Table 1과 같다. 선정된 항목에 대한 조사는 2014 상수도통계(MOE, 2016)와 지방공기업 경영정보 공개시스템을 통해 공개되어있는 2014년 지방공기업 감사결과를 중심으로 실시하였다. 한편, 조사자료의 신뢰성을 제고하기 위하여, 조사된 자료는 각 상수도 지방공기업별 홈

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

페이지를 통해 공개된 자료와의 비교검토를 실시하였으며, 차이가 발생한 경우에는 사업장 방문 또는 온라인 조사를 추가로 실시하였다.

2.1.3 수도사업자 군 분류

수도사업자의 수도여건, 유수율에 따라 상수도관망 유지관리비는 변화한다. 가령, 수도여건이 좋고, 유수

율이 높은 수도사업자에 적용할 상수도관망 적정 유지관리비를 수도여건이 나쁘고, 유수율이 낮은 수도사업자에 적용하는 것은 상당한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수도사업자의 수도여건과 유수율을 고려하여 수도사업자의 군을 분류한 뒤 수도사업자 군에 따른 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델을 개발하고자 하였다.

Table 1. Selected influence factor for water pipes maintenance cost

Category	Factors	Variable	Reference
Water balance factor	Total water volume (m ³)	X1	2014 waterworks statistics
	Revenue water (m ³)	X2	2014 waterworks statistics
	Revenue water ratio (%)	X3	2014 waterworks statistics
	Leakage volume (m ³)	X4	2014 waterworks statistics
	Leakage ratio (%)	X5	2014 waterworks statistics
Service scale factor	Size of district area (km ²)	X6	2014 waterworks statistics
	Number of service population (people)	X7	2014 waterworks statistics
	Number of service connection (connection)	X8	2014 waterworks statistics
	Pipe length(km)	X9	2014 waterworks statistics except conveyance pipes
	Service population density (people/km ²)	X10	X7 / X6
	Service connection density (connection/km ²)	X11	X8 / X6
	Service population per pipe length (people/km)	X12	X7 / X9
	Total water volume per pipe length (m ³ /km)	X13	X1 / X9
Pipes condition factor	Rate of pipe age(0~5) (%)	X14	0~5 year pipe length / X9
	Rate of pipe age(6~10) (%)	X15	6~10 year pipe length / X9
	Rate of pipe age(11~15) (%)	X16	11~15 year pipe length / X9
	Rate of pipe age(16~20) (%)	X17	16~20 year pipe length / X9
	Rate of pipe age(more than 21) (%)	X18	more than 21 year pipe length / X9
	Rate of pipes passing service life (%)	X19	2014 waterworks statistics
Finance factor	Financial independence rate (%)	X20	2014 Annual accountants report
	Rates of recovering costs from water prices (%)	X21	2014 waterworks statistics
	Unit cost of water pipes maintenance (1,000Won/m)	X22	water pipes maintenance cost / X9
	Tap water price (Won/m ³)	X23	2014 waterworks statistics
Personnel factor	Number of staff (people)	X24	Investigation of water service provider
	Number of staff for water pipes (people)	X25	Investigation of water service provider
	Rate of staff for water pipes (%)	X26	X25 / X24
	Personnel expenses for water pipes (Won)	X27	Total personnel expences × X26
District property factor	Rate of detached house (%)	X28	2010 National statistics
	Rate of apartment house (%)	X29	2010 National statistics
	Slope (%)	X30	Digital elevation model analysis
Others	Rate of using multi-regional water volume (%)	X31	2014 Annual accountants report



수도사업자의 균은 상수도관망 유지관리비에 영향을 주는 영향요인에 대한 상관분석, 군집분석의 통계분석을 통해 도출하였다.

상관분석은 사전 전문가집단 조사를 통해 상수도관망 유지관리비에 영향을 줄 것으로 예상되는 요인 중 실제적으로 영향을 주는 요인을 선정하기 위해 실시하였으며, 표본의 숫자가 많지 않음을 고려하여 상관성 분석결과의 신뢰도 검증을 추가로 실시하였다. 본 연구에서는 Kim et al, (2013)의 연구방법을 참조하여 표본수에 대비한 표준상관계수와와의 비교를 위한 t-검정(유의수준 0.05)을 수행하는 방법을 활용하였다. 다음 Equation 1은 표본수에 대비한 표준상관계수를 도출하기 위한 식을 나타낸다. 신뢰도 검증이 완료되어 상수도관망 유지관리비에 영향을 주는 것으로 판단되는 영향인자들은 이후 통계분석에서 주요 변수로써 활용하였다.

$$r_a = \frac{t_a}{\sqrt{n-2+t_a^2}} \quad (1)$$

여기서, r_a : α -유의수준에서 표준 상관계수
 t_a : α -유의수준에서 t-value (t-검정)
 n : 표본 수

수도사업자의 균을 분류하기 위해서 K-평균 군집분석을 수행하였다. 군집분석에 사용한 주요 변수는 주성분분석을 통해 도출된 주성분을 활용하였다. 주성분분석은 여러 가지 영향요인을 상호 독립적으로 만들어 영향요인 사이의 주요 성분을 도출하는 분석법으로써, 분석결과의 신뢰성을 제고할 수 있다(Shim, 2005). 주성분분석시에는 상관분석의 결과로 도출된 상수도관망 유지관리비 영향인자를 변수로 활용하였으며, 고유값(Eigenvalue)이 1.0 이상이고, 누적 분산값이 80 % 이상인 주성분까지를 선택하였다.

군집분석을 수행한 후에는 주성분에 따라 나누어진 수도사업자 군이 목표표하는 상수도관망의 유지관리비 측면에서 유의한지 여부를 판단하기 위해 분산분석을 수행하여, 수도사업자 군 분류의 적합성을 검정하였다.

2.1.4 수도사업자의 경영환경에 따른 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델 개발

수도사업자 군별 상수도관망 적정 유지관리비는 상관분석을 통해 상수도관망 유지관리비에 영향을 주는 인자로 선정된 변수를 활용하여 유지관리비에 대한

중회귀분석을 통해 산정하였다.

중회귀모형을 만드는 과정은 독립변수를 단계별로 하나씩 포함시키며 통계적 유의성을 검증한 뒤, 통계적 유의성이 확보되는 독립변수는 포함시키고, 통계적 유의성이 확보되지 못한 독립변수를 제거하는 방법인 단계선택법을 활용하였다. 여기서, 독립변수를 포함하는 F값의 유의확률로는 일반적으로 사용하는 0.05를 적용하였으며, 독립변수를 제거하기 위한 F값의 유의확률로는 일반적으로 사용하는 0.10을 적용하였다. 여기서, F값이란 독립변수를 포함시키지 않고 구한 회귀제곱합과 독립변수를 새로이 포함시킨 뒤 도출되는 추가제곱합의 비율로써 표현된다.

도출된 최종 중회귀모형에 대해서는 모형에 대한 유의성 검정(분산분석), 회귀계수에 대한 유의성 검정을 통해 산정식의 적합성을 나타내었다.

2.2 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델의 적용

개발한 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델을 활용하여 분류된 수도사업자 군별, 우수율에 따라 상수도관망 유지관리비가 어느정도 소요될 것인지를 도출하였다.

또한, 개발 모델의 적용성을 파악하기 위한 실증연구를 수행하였다. 적용 대상 수도사업자는 우수율이 62 % 수준인 H군으로 선정하였으며, H군 수도사업자가 장래 우수율 제고를 위해 설정할 수 있는 다양한 시나리오를 설정하여 분석한 결과를 나타내었다.

3. 연구 결과

3.1 우수율에 따른 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델 개발 결과

3.1.1 수도사업자 상수도관망 유지관리비 조사 및 영향요인 분석 결과

92개 수도사업자에 대해 조사한 상수도관망 유지관리비는 수도사업자의 급수 규모에 따라 편차가 상당한 값이므로, 수도사업자별 관망의 규모를 고려하여 상수도관망 유지관리비 원단위(백만 원/km)를 산정하여 비교분석을 수행하였다. 다음 Fig. 2는 특광역시, 시지역, 군지역 수도사업자의 상수도관망 유지관리비 원단위를 비교한 결과를 나타내며, Table 2는 지역별 상수도관망 유지관리비 원단위에 대한 통계자료를 나타낸다.

pp. 001-006
 pp. 007-012
 pp. 013-019
 pp. 021-028
 pp. 029-037
 pp. 039-050
 pp. 051-062
 pp. 063-072
 pp. 073-081
 pp. 083-091
 pp. 093-101
 pp. 103-114

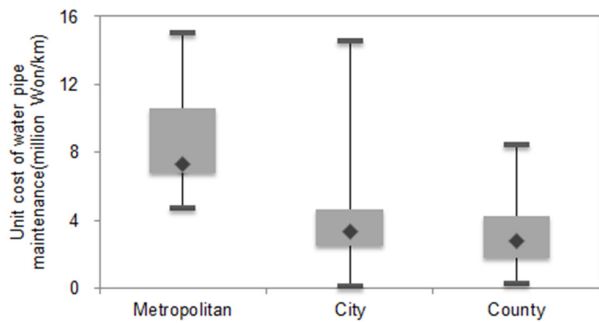


Fig. 2. Unit cost for water pipes maintenance by region

특광역시의 경우 상수도관망 유지관리비로 관로 1 km 당 평균 10.34백만 원의 비용을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 시·군지역의 경우 평균 3.60백만 원/km, 2.86백만 원/km로 특·광역시의 25% ~ 30% 수준의 비용원단위를 갖는 것으로 나타났다.

특·광역시와 시·군지역의 상수도관망 유지관리비는

차이가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 특광역시 유지관리비 원단위 최대값과 시지역 유지관리비 원단위 최대값은 큰 편차가 없는 것으로 나타났다. 또한, 시지역과 군지역은 상수도관망 유지관리비 원단위 사이의 명확한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 명확한 구분이 어려운 원인은 행정적인 기준에 의해 구분된 특광역시/시지역/군지역은 수도사업자의 수도여건을 반영하고 있지 못하고 있기 때문이라 판단된다. 그러므로 표준화된 유지관리비의 적용을 위해서는 행정적 기준에 의해 구분된 수도사업자가 아닌 수도사업자의 특성을 반영한 구분이 필요할 것으로 판단된다.

수도사업자별로 산정한 상수도관망 유지관리비와 선정한 31 개 영향요인 사이의 상관분석을 실시한 뒤, 표준상관계수와와의 비교를 위한 t-검정을 수행한 결과는 다음 Table 3과 같다. 유의수준 0.05일 때의 표본수 92 개에 대한 표준 상관계수는 0.2672로 나타난다. 그러므로 상수도관망 유지관리비와의 상관계수가

Table 2. Statistics of unit cost for water pipes maintenance by region.

Region	Unit cost for water pipes maintenance (million Won/km)				
	Average	Max	Median	Min	Standard deviation
Metropolitan	10.34	15.02	7.32	4.73	3.68
City	3.60	14.50	3.36	0.10	2.69
County	2.86	8.41	2.80	0.26	2.20

Table 3. Result of correlation analysis using t-test

Variable	Correlation coeff.	$\gamma 0.05$	Judgement	Variable	Correlation coeff.	$\gamma 0.05$	Judgement
Y	-	-	-	X16	0.061		
X1	0.967	**		X17	0.192		
X2	0.969	**	O	X18	0.298	**	O
X3	0.295	**	O	X19	-0.103		
X4	0.605	**	O	X20	0.514	**	O
X5	-0.255			X21	0.213		
X6	0.041			X22	0.412	**	O
X7	0.975	**		X23	-0.221		
X8	0.937	**		X24	0.978	**	
X9	0.930	**	O	X25	0.981	**	O
X10	0.556	**		X26	-0.029		
X11	0.729	**	O	X27	0.969	**	
X12	0.390	**		X28	-0.251		
X13	0.355	**		X29	0.162		
X14	-0.192			X30	-0.075		
X15	-0.159			X31	-0.188		



0.2672 이상으로 나타난 인자는 신뢰수준 95%에서 상관성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

상관분석 결과 상수도관망 유지관리비와 유효한 상관성을 나타내는 인자는 모두 17 개로 나타났다. 여기서, 인자와 인자 사이의 상관성이 나타나는 경우에는 두 가지 인자 모두를 활용하는 것보다 한 가지 인자를 활용하는 것이 타당하다. 따라서 각 개별 인자들 사이의 상관분석을 통해 상수도관망 유지관리비 영향인자로서, 최종적으로 9가지 영향인자(유수수량, 유수율, 누수량, 관로연장, 급수전밀도, 21년 이상 관로 비율, 재정자립도, 유지관리비원단위, 기술기능직직원수)를 선정하였다.

3.1.2 수도사업자 군 분류 결과

수도사업자의 군은 상관분석의 결과로 선정된 9 가지 상수도관망 유지관리비 영향요인에 대한 주성분분석을 실시하고, 주성분분석결과를 중심으로 군집분석을 수행함으로써 분류하였다.

9 가지 상수도관망 유지관리비 영향요인에 대한 주성분분석을 실시한 결과 3주성분까지 고유값이 1이상으로 나타났으며, 3주성분까지의 누적 분산값은 81.069 %로

나타났다. 이는 주성분 3 가지가 전체 분산량의 81.069 %를 설명하고 있음을 나타내며, 이를 통해서도 3주성분까지 추출한 결과가 양호함을 판단할 수 있다. 다음 Table 4는 주성분분석결과에 해석의 용이성을 고려하여 주성분축이 상호 독립적이도록 직교상태를 유지하면서 회전을 시키는 varimax rotation을 수행한 결과를 나타낸다. 주성분 분석 결과, 제1주성분은 관로연장, 기술기능직직원수, 유수수량, 누수량, 급수전밀도 순으로 성분이 적재되는 빈도가 높은 것으로 나타났다. 제2주성분의 경우 유수율과 재정자립도가, 제3주성분의 경우 21년 이상 관로 비율과 유지관리비원단위가 적재되는 것으로 나타났다.

3가지의 주성분으로 요약된 요인점수를 활용하여 96 개 수도사업자에 대한 K-평균 군집분석을 실시한 결과 특별시인 S시는 독립적인 군을 형성하는 것으로 나타났다. 다음 Table 5는 수도사업자의 분류를 위해 4 개로 나누어진 군에 포함된 표본의 숫자, 상수도관망 유지관리비 원단위 및 유수율의 평균 및 편차를 나타낸다.

여기서, 군집별 상수도관망 유지관리비 원단위 평균값과 유수율은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 독립적인 군을 형성한 1군을 제외하고, 2군, 3군, 4군을 대상으로 상수도관망 유지관리비 원단위 평균값과 유수율이 차이를 나타내는 것이 통계적으로 유의한 차이인지를 파악하기 위하여 분산분석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다.

분산분석 결과, 총 4 개의 군으로 분류된 수도사업자 군이 군별로 상수도관망 유지관리비 원단위와 유수율 사이의 차이가 있다는 결과가 도출되었다. 따라서 본 연구에서 주성분분석을 통해 도출한 주성분을 기준으로 구분한 수도사업자 군은 수도사업자의 상수도관망 유지관리비 원단위와 유수율을 구분짓는 것으로 판단할 수 있다. 상수도관망 유지관리비 원단위와 유수율은 수도사업자의 상수도관망 유지관리업무 특성을 구분짓는 요인으로 작용하고 있는 것으로 나타났다.

Table 4. Varimax rotation result of principal component analysis

Variable	Component		
	1	2	3
X9	0.941	0.226	0.068
X25	0.931	0.219	0.137
X2	0.924	0.282	0.120
X4	0.768	-0.028	0.286
X11	0.675	0.316	0.306
X3	0.111	0.955	0.005
X20	0.428	0.774	0.190
X18	0.129	0.011	0.873
X22	0.199	0.125	0.759

Table 5. Result of cluster analysis

Category		Group			
		1	2	3	4
Number of sample		1	17	36	42
Unit cost of water pipes maintenance (million Won/m)	Average	15.024	7.676	3.213	2.142
	Std.	-	2.778	2.181	1.748
Revenue water ratio (%)	Average	95	82	85	64
	Std.	-	11.03	5.32	7.55

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

Table 6. Results of variance analysis

Case	Explanation	F value	Sig.
A1	Comparison between group 2 and group 3 about unit cost of water pipes maintenance	66.603	0.000
A2	Comparison between group 2 and group 4 about unit cost of water pipes maintenance	59.795	0.000
A3	Comparison between group 3 and group 4 about unit cost of water pipes maintenance	3.737	0.047
B1	Comparison between group 2 and group 3 about revenue water ratio	4.003	0.019
B2	Comparison between group 2 and group 4 about revenue water ratio	50.558	0.000
B3	Comparison between group 3 and group 4 about revenue water ratio	179.685	0.000

1군을 제외한 나머지 군의 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다. 2군에 포함된 수도사업자는 도시 규모가 크고, 우수율이 80.0 % 이상으로 높은 특성을 나타내었다. 또한 노후관로의 비율이 10.0 % 미만으로 낮게 나타났다. 3군에 포함된 수도사업자는 우수율이 80.0 % 이상으로 높게 나타났으나 노후관로의 비율이 10.0 % 이상으로 나타나, 2군과 3군 수도사업자를 구분하는 주요 특성 중 하나로 노후관로의 비율이 작용하는 것으로 나타났다. 한편, 4군에 포함된 수도사업자는 대부분 군 단위 도시로 도시 규모가 작은 수도사업자였다. 또한 4군에 포함된 수도사업자는 우수율이 대부분 70.0 % 미만으로 낮고, 노후관로의 비율이 높은 특성을 나타내었다.

3.1.3 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델 개발 결과

표본 숫자가 1 개인 1군을 제외하고, 2군과 3군, 4군 수도사업자에 대하여 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델을 개발한 결과는 Table 7과 같다.

각 군별 모델은 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다. Table 8은 각 군별 모델의 모형 유의성을 검정하기 위한 분산분석의 결과를 나타낸다. F통계량에 대한 유의확률이 모든 모형에서 0.05보다 낮게 나타나, 모형이 유의하다는 결론이 도출되었다. Table 9는 각 군별 모델에 포함된 회귀계수의 유의성 검정 결과를 나타낸다. 각 독립변수들의 t통계량에 대한 유의확률은 95 % 신뢰수준에서 모두 유의한 결과를 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 개발한 수도사업자 군별 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델은 모두 통계적으로

Table 7. Developed model for optimum maintenance cost of water pipes

Group	Model	Corr. Coeff.(R)
2	$Y_2 = -2,728.821 + (300.397) \times X_{22} + (148.919) \times X_{25}$	0.997
3	$Y_3 = -5,227.607 + (27.754) \times X_3 + (1.723) \times X_9 + (954.912) \times X_{22} + (60.606) \times X_{25}$	0.993
4	$Y_4 = 3,406.211 + (1.00 \times 10^{-5}) \times X_2 + (56.832) \times X_3 + (-7.543) \times X_{11} + (2.560) \times X_{18} + (310.556) \times X_{22}$	0.975

유의한 것으로 나타났으며, 모델의 상관계수를 보았을 때, 상당한 신뢰성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

광역시 또는 일정규모 이상의 도시로 80 % 이상의 우수율을 달성하고 있는 수도사업자의 경우(2군), 유지관리비가 관망유지관리비 원단위와 기술기능직 직원수에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 유지관리비를 줄이기 위해서는 투입되는 유지관리비를 줄이는 방안 또는 기술기능직 직원수를 줄이는 방안을 생각해볼 수 있겠으나, 관망유지관리비를 줄이기 위해 직원수를 줄이는 것은 효율적이지 않을 수 있으므로 효율성분석과 같은 면밀한 검토가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

그 외의 지역에서는 상수도관망 유지관리비가 관로 연장, 우수율, 21년 이상 관로 비율 등의 함수로써 표현되었다. 특히, 우수율을 높이기 위해서는 유지관리비의 증가가 필요한 것으로 나타났으며, 21년 이상 관로비율이 증가할수록 유지관리비가 증가하는 점(4군)을



Table 8. Results of variance analysis for developed model

Group	Model	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	Sig.
2	Regression	9.93×10^9	2	4.97×10^9	1025.893	0.000
	Residual	6.78×10^8	14	4.84×10^8		
	Total	1.00×10^{10}	16			
3	Regression	4.60×10^9	4	1.15×10^8	559.627	0.000
	Residual	6.37×10^8	31	2.05×10^7		
	Total	4.66×10^9	35			
4	Regression	4.56×10^8	5	9.13×10^8	138.528	0.000
	Residual	2.37×10^7	36	6.59×10^7		
	Total	4.80×10^8	41			

Table 9. Results of significance test of regression coefficients

Group	Variable	Unstandardized coefficients	Standardized coefficients	t value	Sig.
2	(Constant)	-2,728.821	-	-2.262	0.040
	X22	300.397	0.046	2.097	0.046
	X25	148.919	0.978	42.852	0.000
3	(Constant)	-5,227.607	-	-1.037	0.308
	X3	27.754	0.013	2.344	0.033
	X9	1.723	0.221	2.767	0.009
	X22	954.912	0.180	6.150	0.000
	X25	60.606	0.646	7.730	0.000
4	(Constant)	3,406.211		2.878	0.007
	X2	1.00×10^{-5}	1.094	20.830	0.000
	X3	56.832	0.122	3.213	0.003
	X11	-7.543	-0.357	-7.835	0.000
	X18	2.560	0.011	2.562	0.039
	X22	310.556	0.159	3.991	0.000

고려하였을 때, 노후관의 증가추이를 고려하여 점진적으로 유지관리비를 증가시킬 필요가 있다는 결과도 도출되었다.

따라서 향후 시·군지역의 우수율의 제고를 위해서는 노후관로에 대한 대비가 가능한 수준의 상수도관망 유지관리비를 편성할 필요성이 있다고 판단된다.

3.2 개발 모델의 적용 결과

3.2.1 수도사업자 군별, 우수율별 상수도관망 적정 유지관리비 도출 결과

3군과 4군으로 분류된 수도사업자를 대상으로 개발된 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델은 변수로써 수도사업자의 우수율을 고려해야한다. 여기서, 수도사

업자의 특성이 3군에 가까운지, 4군에 가까운지에 따라 적용해야하는 모델식이 다르므로, 본 절에서는 우수율에 따라 상수도관망의 적정 유지관리비로써 어느 정도의 비용을 적용해야하는지를 산출하였다. 3군에 해당하는 수도사업자와 4군에 해당하는 수도사업자의 우수율 분포는 다음 Fig 3과 같다.

3군의 우수율 하위 25 %를 나타내는 1분위수는 80.9 %로, 4군의 우수율 상위 25 %를 나타내는 3분위수는 69.3 %로 나타났다. 본 연구에서는 3군의 1분위수와 4군의 3분위수의 평균값인 우수율 75 %를 기점으로 3군과 4군을 구분하여, 우수율에 따라 다른 모델식을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다. 한편, 4군의 경우 우수율 최소값이 47.0 %로 나타났으며, 3군의 경우 우수율 최대값이 92.0 %로 나타났다. 이를 고려하여 본 연구에서

- pp. 001-006
- pp. 007-012
- pp. 013-019
- pp. 021-028
- pp. 029-037
- pp. 039-050
- pp. 051-062
- pp. 063-072
- pp. 073-081
- pp. 083-091
- pp. 093-101
- pp. 103-114

개발한 모델을 적용하기 위한 유수율의 범위는 50% ~ 90%로 설정하는 것이 적절하다고 판단된다.

수도사업자마다 관로연장이 상이하고, 상수도관망 관리 인력수, 노후관 비율 등과 같은 수도여건이 상이하 다. 따라서 3군과 4군 수도사업자의 평균 관로연장인 1,200 km를 대상으로 설정하고, 그 외의 변수들은 각 군 수도사업자의 평균값을 적용하여 상수도관망 적정 유지 관리비를 유수율에 따라 산출한 결과는 Fig 4와 같다.

유수율이 낮은 수도사업자일수록 표준 유지관리비가 높은 것으로 나타났다. 이는 수도여건이 열악하여 상수도관망의 유지관리에 필요한 업무가 많기 때문이다. 한편, 3군 수도사업자와 4군 수도사업자를 구분한 기준이 된 유수율 75 %를 기점으로, 유수율 75 % 이상의 수도사업자는 유수율이 75 % 미만인 수도사업자보다 상수도관망의 운영 및 유지관리를 위해 소요 해야하는 비용이 적은 것으로 나타났으며, 유지관리비의 증가폭 역시 유수율이 낮은 수도사업자에서 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 결과들을 종합하였을 때, 유수율 75 %를 기점으로 상수도관망 유지관리의 안정성이 형성되는 것으로 판단되며, 따라서, 유수율이 낮은 수도사업자는 1차적으로 유수율 75 % 달성을 목표로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

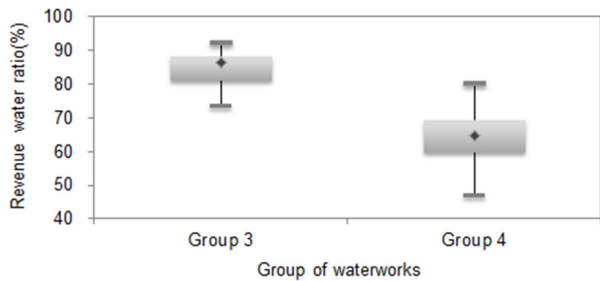


Fig. 3. Box plot of revenue water ratio by group of waterworks.

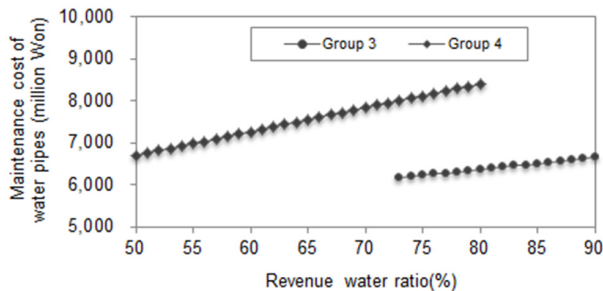


Fig. 4. Maintenance cost of water pipes by revenue water ratio.

다만, Fig 4에 나타난 상수도관망 표준 유지관리비는 각 개별 수도사업자의 모든 수도여건이 반영되어 나타난 결과라고 표현하기는 어렵다. 각 수도사업자 별로 고유한 수도여건을 반영하기 위해서는 앞서 도출한 모델을 적용하는 것이 적절하다.

3.2.2 H군 수도사업자의 장래 상수도관망 적정 유지관리비 산정 결과

2014년 말 유수율이 62 %인 H군 수도사업자는 본 연구에서 수도사업자의 특성별로 구분한 수도사업자 군 중 4군에 포함된다. H군은 2014년에 상수도관망 유지관리비로 1,297백만 원을 사용한 것으로 나타났다. 그러나 H군의 유수율 및 수도규모 등을 고려하였을 때, 표준 유지관리비는 7,083백만 원으로 나타났다. 따라서, 향후 유수율의 제고 및 안정적인 상수도관망 유지관리를 위해서는 2014년 상수도관망 유지관리비를 대폭 향상시킬 필요성이 있는 것으로 나타났다.

현재의 유수율 62 %이 향후 20년동안 변동이 없고, 현재의 수준을 그대로 유지하는 가운데 노후관로의 비율만 변동이 된다고 가정하면 H군은 향후 20년동안 다음 Fig 5와 같이 상수도관망에 대해 유지관리비용을 지출해야하는 것으로 나타났다.

현재 62 % 수준인 유수율을 지속적으로 유지하는 것은 장기적인 상수도 재정운영을 고려하였을 때 바람직하지 않다. 따라서 유수율을 점진적으로 높이는 경우 상수도관망 유지관리비가 어떻게 변동되는지에 대한 시나리오분석을 실시하였다. 각 시나리오에 따라 연도별 상수도관망 유지관리비용을 산출한 결과는

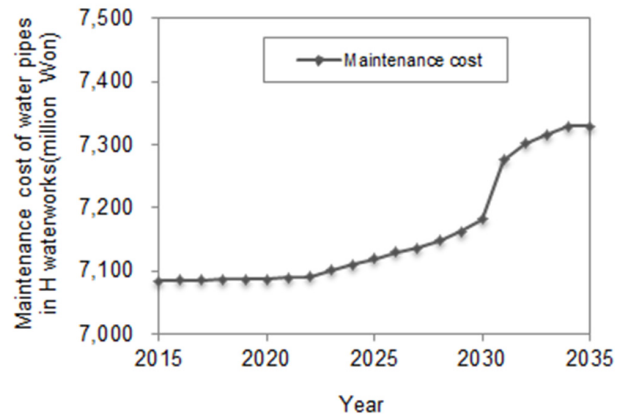


Fig. 5. Result of predicted maintenance cost in H city's waterworks.



Table 10. Result of scenario analysis by revenue water ratio for H city's waterworks

Scenario	Revenue water ratio increase by annual(%)	Target revenue water ratio	Achievement year of target revenue water ratio	Total maintenance cost of water pipes in H waterworks (million Won)
C1	never changed	-	-	150,331
C2	0.6	74.6	2035	158,014
C3	1	75	2027	131,594
C4	1	83	2035	134,393
C5	2	90	2028	128,187

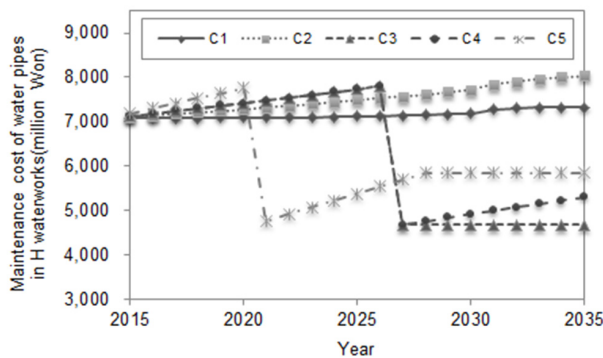


Fig. 5. Result of scenario analysis for H city's waterworks.

다음 Fig 6, Table 10과 같다. 여기서, 유수율이 75 %를 넘는 경우에는 기존 4군으로 분류되었던 H군이 3군으로 포함된다고 가정하여 3군의 모델식을 적용하였다. 모델식에 포함되는 주요 요인들은 2014년 현재에서 변화되지 않는다고 가정하였다.

유수율을 현재와 유사한 수준으로 유지하는 경우 (Scenario C1) 향후 20년동안 상수도관망의 유지관리 비용으로써 사용되어야 하는 금액은 150,331백만 원으로 나타났다. 만약 유수율을 연도별로 0.6%씩 증가시키는 경우(Scenario C2)에는 158,014백만 원의 비용이 소요되는 것으로 나타나 미미한 유수율의 증가는 오히려 현행 유수율을 유지하는 것 보다 소요되는 비용이 더 많은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Scenario 2와 Scenario 3을 비교하는 경우에도 파악할 수 있다.

2020년까지 6년간, Scenario C4의 경우 43,651백만 원의 유지관리비용이, Scenario C5의 경우 44,844백만 원의 비용이 투자되어야 하는 것으로 나타나, C4와 C5를 비교할 때 유수율 제고를 위해 초기에 투자되어야 하는 비용은 C5가 더 1,193백만 원 더 많은 것으로 분석되었다. 그러나 더 빠른 시간에 높아진 유수율로

인해 20년간을 분석하였을 때에는 C5가 C4보다 6,206백만 원의 비용을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 종합적으로, H군의 경우 2014년 62 % 수준의 유수율을 그대로 유지하는 것보다 초기 투자비용은 높으나 유수율을 빠른 시간에 높이는 경우에는 장기적인 관점에서 상수도관망 유지관리비용을 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 수도사업자의 상수도관망 유지관리비를 조사하고, 유지관리비에 영향을 주는 요인들에 대한 통계분석을 활용하여 수도사업자의 경영환경을 반영한 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델을 개발하였다. 개발한 모델은 모두 상관계수가 0.95 이상으로 나타나 상당한 신뢰성을 가지며, 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다.

개발한 모델의 적용을 통한 실증연구를 통해 장래 목표 유수율을 설정하기 위한 방안을 분석하였다. 유수율을 제고하면 상수도관망 운영 및 유지관리에 효율성을 증진시킬 수 있다. 유수율이 낮은 군지역의 경우 만성적인 수도경영 적자에 시달리고 있는 경우가 많다. 이러한 지역은 상대적으로 많은 상수도관망 유지관리비용을 필요로 하고 있다. 이에 따라 유지관리비용 지출을 줄이기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다.

그러나 연구의 결과에서도 알 수 있듯이 유수율을 일정 수준 이상으로 높이는 경우 상수도관망 유지관리비용은 큰 폭으로 저감될 수 있다는 결과가 도출되었다. 즉, 단기간의 유수율을 일정 수준 이상으로 상승시켜 수도 경영의 안정성을 확보한뒤 점진적으로 유수율을 증가시키는 방법이 장기적인 관점에서는 가장 효율적이라고 판단된다.

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

본 연구에서 개발한 상수도관망 적정 유지관리비 산정 모델은 향후 수도사업자가 목표로 설정한 유수율을 달성하기 위해 필요로 하는 유지관리비를 산출하는데 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 본 연구에서 제안한 방법론 및 연구의 결과들은 상수도관망 유지관리계획 수립 또는 상수도시설 자산관리계획 수립 등의 기초연구로써 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부 “환경정책기반 공공기술개발사업 - 상수도시설의 운영 및 자산관리 통합시스템 개발 (2014000700001)” 으로부터 지원 받았습니다.

References

- Dandy, G. C., and Engelhardt, M. O. (2006). Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132 (2). 79-88.
- KECO(Korea Environment Corporation), (2010), Basic plan for construction of optimal water pipe network management system in Taebaek region, KECO.
- Kim, K. (2015). The optimal renewal planning using dynamic programming in water pipelines, Master's Thesis, University of Seoul, pp.193.
- Kim, M., Inakazu, T., Koizumi, A., and Koo, J. (2013). Statistical approach for corrosion prediction under fuzzy soil environment, *Environmental Engineering Research*, 18 (1). 1-7.
- Kleiner, Y., Adams, B. J., ASCE, and Rogers, J. S. (2001). Water distribution network renewal planning, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15 (1). 15-26.
- MOE(Ministry of Environment), (2016). 2014 Statistics of waterworks, MOE.
- MOE(Ministry of Environment), (2015). Status assessment and feasibility study for maintenance project of aged local waterworks, MOE.
- Shamir, U., and Howard, C. D. D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement, *Journal of American Water Works Association*, 71 (5). 248-258.
- Shim, M. (2005). Estimating long-term water demand by principal component and cluster analysis in central Seoul, Master's Thesis, University of Seoul. pp.81.
- Shin, H. (2012). Optimal scheduling of replacement and renovation of water distribution systems using genetic algorithm, Master's Thesis, University of Seoul, pp.137.
- Walski, T. M., and Pelliccia, A. (1982). Economic analysis of water main breaks, *Journal of American Water Works Association*, 74 (3). 140-147.