



급수지역 여건을 고려한 우수율 변동 분석 및 적정 우수율 제고 사업비 산정 모델 개발

A study on the evaluation for variation of revenue water ratio considering water supply area conditions and the development of proper cost estimation model of project for improvement of revenue water ratio

권기원 · 형진석 · 김태현 · 박해금 · 오유진 · 구자용*

Kiwon Kwon · Jinseok Hyung · Taehyeon Kim · Haekeum Park · Yoojin Oh · Jayong Koo*

서울시립대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

In this study, we analyzed how the revenue water ratio(RWR) is affected by changes in conditions of the water supply area, such as the ratio of aging pipes, maintenance conditions, and revenue water. As a result of analyzing the impact of pipe aging and maintenance conditions on the RWR, it was confirmed that the RWR could be decreased if the pipe replacement project to improve the aging pipe ratio was not carried out and proper maintenance costs were not secured.

Received 26 September 2023, revised 10 December 2023, accepted 11 December 2023.

*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr; Tel. 82-2-6490-2866)

1 권기원 (박사과정) / Kiwon Kwon (Ph.D. Student)

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

1 형진석 (연구교수) / Jinseok Hyung (Research Professor)

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

1 김태현 (연구교수) / Taehyeon Kim (Research Professor)

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

1 박해금 (박사과정) / Haekeum Park (Ph.D. Student)

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

1 오유진 (박사과정) / Yoojin Oh (Ph.D. Student)

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

1 구자용 (교수) / Jayong Koo (Professor)

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

pp. 311-324

pp. 325-334

pp. 335-345

pp. 347-361

pp. 363-373

pp. 375-382

pp. 383-394

pp. 395-408

pp. 409-423

pp. 425-435

pp. 437-446

pp. 447-456

It was also confirmed that an increase in the revenue water could be operated to facilitate the achievement of the project's target RWR. In contrast, a decrease in the revenue water due to a population reduction could affect the failure of the target RWR. In addition to analyzing the causes of variation in the RWR, the calculation of estimated project costs was considered by using leakage reduction instead of RWR from recent RWR improvement project cost data. From this analysis, it was reviewed whether the project costs planned to achieve the target RWR of the RWR improvement project in A city were appropriate. In conclusion, the RWR could be affected by variations in the ratio of aging pipes, maintenance conditions, and revenue water, and it was reasonable to consider not only the construction input but also the input related to RWR improvement, such as leakage reduction, when calculating the project cost.

Key words: Multiple Regression Analysis; Project cost; Revenue water ratio(RWR); RWR improvement project

주제어: 다중회귀분석, 사업비, 유수율, 유수율 제고 사업

1. 서 론

전국적으로 2017년부터 지방상수도 현대화사업의 일환으로 노후 상수관망 정비사업이 추진되어 노후 상수관로로 인한 누수 및 파손사고와 수질오염을 저감할 수 있는 관망체계가 구축되고 있다. 노후 상수관망 정비사업은 노후 수도시설의 정비만을 목표로 하지 않고, 사업대상 급수구역에서의 목표 유수율을 85% 이상으로 설정하여 해당 유수율의 달성을 목표로 한다 (MOE, 2021). 사업수행자는 목표 유수율을 달성하기 위하여 노후관 정비, 수도계량기 정비, 누수탐사·복구, 압력관리설비 설치 등 다양한 유수율 제고 방법을 조합하여 수행하게 된다.

하지만 사업대상지역의 여건에 따라 유수율 제고 방법의 조합이 달라져 사업 수행 난이도가 높아질 수 있고, 사업 종료 이후 사업의 성과보증 기간동안 사업 내용과 관련성이 떨어지는 외부 요인이 유수율에 영향을 미쳐 사업 성과보증 시 이해관계자 간 분쟁이 발생할 수 있다. 사업 초기의 유수율, 노후관 비율, 관망의 형상 등 노후 상수관망 정비 여건은 지역에 따라 상이하여 목표 유수율 달성을 위한 사업 수행 난이도가 달라지게 된다. 또한 사업 종료 시 목표 유수율을 달성하였다고 하더라도 사업 종료 후 성과보증 기간 동안 계절적, 지역적, 사회적 특성에 따라 유수율 변동이 발생하여 사업에 의한 유수율 개선 효과를 객관적으로 측정하기 어려운 경우에는 수도사업자와 사업수행자 간의 분쟁이 발생하기도 한다.

따라서 노후 상수관망 정비사업 이후 성과보증기간 동안에 대하여 사업 외적 요인에 따른 유수율의 영향을 판정할 수 있는 기준이 필요하다. 이러한 기준 마

련을 통해 노후 상수관망 정비사업과 관련된 이해관계자 간 분쟁을 완화할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 지역 여건에 따른 사업 난이도를 고려하여 적절한 유수율 제고 방법을 조합함으로써 효과적인 유수율 제고 목표 달성이 가능하다. 이를 위해서는 지역 여건을 고려하여 계획된 사업 내용에 따라 예산을 적정하게 편성하여야 한다.

이에 본 연구에서는 관로 노후화, 관로 유지관리 여건, 유수수량 변화가 유수율에 미치는 영향을 분석하여, 유수율 제고 사업 종료 후 유수율에 대한 사업 성과 측정 지표로서 적정성을 정량적으로 해석하고, 사업목표 유수율 달성을 위하여 노후관 정비, 수도계량기 정비, 누수탐사·복구, 압력관리설비 설치 등 다양한 유수율 제고 방법을 고려할 수 있는 적정사업비 산정방법을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 연구동향

2.1 유수율

유수율은 공급량에 대한 유수수량의 비율을 백분율로 표시한 것이다. 따라서 유수율 제고는 유수수량을 증가시키거나, 공급량을 감소시키는 방법을 고려할 수 있다. 유수수량을 늘리기 위해서는 계량기불감수량, 수도사업 용수량, 공공수량, 부정사용량 등의 유효무수수량을 저감시키는 방법이 있다. 한편, 공급량을 줄이기 위해서는 조정감액수량, 누수량, 사고 및 오차량을 저감시키는 방법이 있다.

이와 같은 유수율은 국내에서 수행된 대표적인 유수율 제고 사업인 상수도관망 최적관리시스템 구축사



업, 지방상수도 현대화사업 중 노후 상수관망 정비사업 등에서 성과지표로 사용되고 있다. 한편, 국외에서는 유수율과 더불어 수도공급 시스템에 대한 평가지표로 유수율과 사용목적은 유사하지만 반대개념인 실손실율(Real losses of system input volume) 및 무수율(Volume of non-revenue water as % of system input value)을 사용하기도 한다. 하지만 IWA(International Water Association)에서는 이러한 수량위주의 성과지표가 배·급수 시스템 경제성 평가에는 사용될 수 있지만 배·급수 시스템의 운전관리 효율평가로 사용하기에는 문제가 있다고 제시하고 있다 (Alegre et al., 2000). 또한 Lambert et al. (1999)은 백분율로 나타낸 지표는 사용량 및 지역여건의 영향을 많이 받으므로 물손실관리 평가지표로 바람직하지 않다고 판단하였다. 즉 유수율은 같은 누수량 조건에서 유수수량에 따라 변동되는 한계를 가지고 있다고 판단한 것이다.

이에 지방상수도 현대화사업 업무편람(MOE, 2021)에서는 주요 성과지표인 사업대상 급수구역 총유수율 외에 추가성과지표로 블록별 유수율, 블록별 압력범위, 수질개선효과, 목표수질, 연간 정비율, 관로성능지수, 누수평가지표, 수도정보, 사고발생율 등을 사용할 수 있도록 하였다. 유수율을 사업 성과지표로 활용하는데 단점을 보완하기 위하여 Koo et al. (2015)은 누수량 관리와 상관없는 유수수량의 변화로 유수율의 변동가능성을 확인함으로써 성과측정지표로서의 유수율의 한계성을 분석하였다. 수도시설 운영자의 노

력이나 의지와 상관없이 사용수량이 감소하면 유수수량이 감소되고 유수율이 저하하는 현상이 발생하게 되고 특히 유수율이 낮은 지역은 유수수량의 변화에 따라 변동 폭이 더욱 크게 나타났다 (Koo et al., 2015). 본 연구에서는 관로 노후화와 관망 유지관리 여건과 유수율 간의 관계를 회귀분석을 통해 분석하여 제시하고, 유수수량의 변동에 따른 유수율 변화 영향을 정량적으로 나타냄으로써 유수율 제고 사업 수행 시 사업 성과로써 유수율 외 추가적인 지표 활용의 필요성을 검토하고자 한다.

2.2 유수율 제고 사업 관련 연구동향 분석

유수율을 제고하기 위해서는 Fig. 1과 같이 실손실량 및 명목손실량 감소전략을 통해 현재의 물손실 수준을 개선하는 것이 필요하다. 실손실량 감소전략인 누수탐사·복구, 압력관리, 노후관 정비 등을 통한 누수량 감소효과로 총 공급량이 감소되며, 명목손실량 감소전략인 공공사용량 요금부과, 계량기 불감수량 저감 등에 따른 유수수량 증대로 유수율을 제고할 수 있게 된다.

Fanner et al. (2007)은 누수저감방법으로 수압저감(전체, 미세), 누수수리 속도 및 품질 개선, 정기적인 누수탐사, 노후관 교체, DMA(District Metered Area) 운영 등을 제시하고 다음 Fig. 2와 같이 시간의 흐름에 따라 누수저감방법의 적용순서 및 손실량 저감의 수준을 제시한 바 있다.

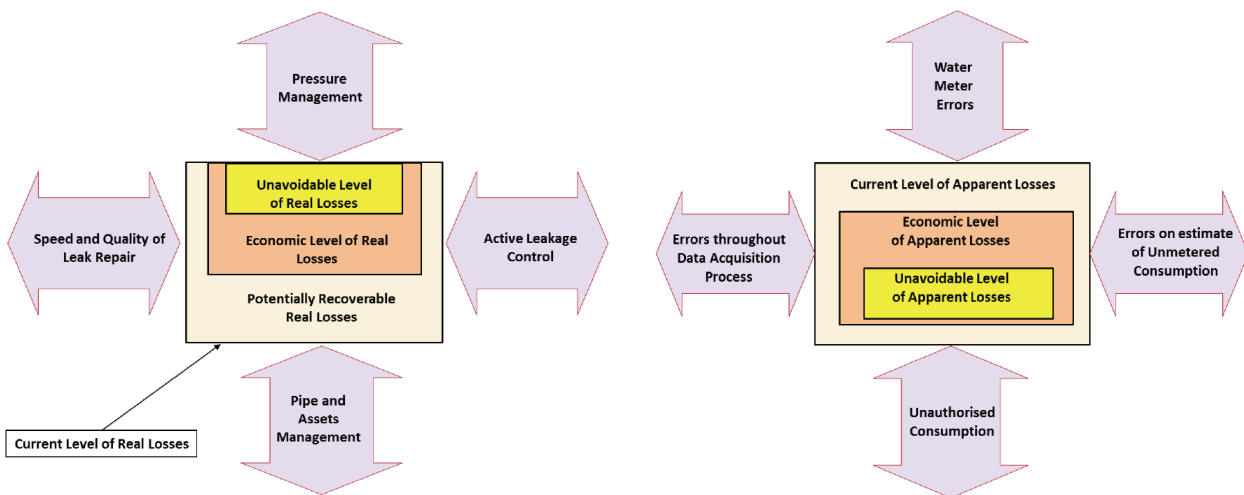


Fig. 1. Water loss management(Lambert et al., 2001; Rizzo et al., 2007).

pp. 311-324
pp. 325-334
pp. 335-345
pp. 347-361
pp. 363-373
pp. 375-382
pp. 383-394
pp. 395-408
pp. 409-423
pp. 425-435
pp. 437-446
pp. 447-456

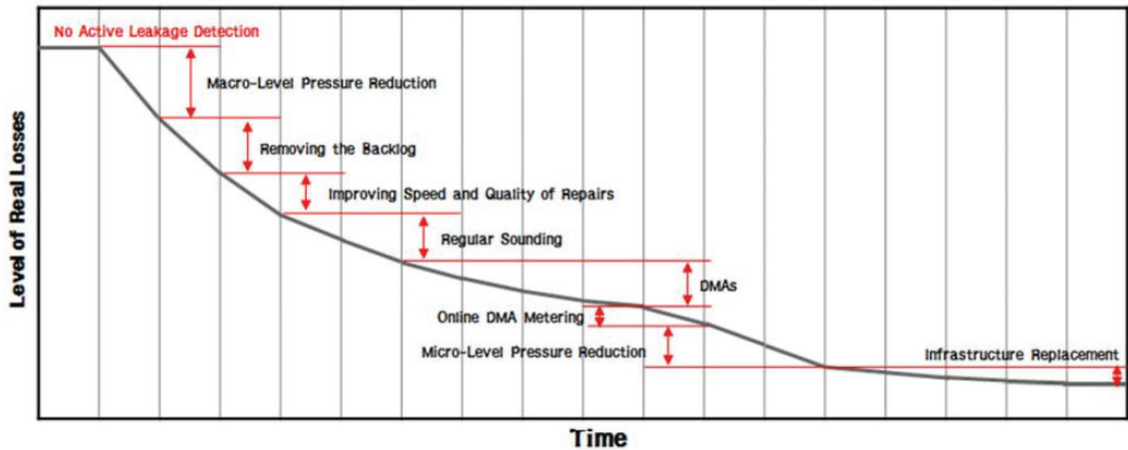


Fig. 2. Portfolio of leakage reduction(Fanner et al., 2007).

이와 같이 제시된 물손실량 저감방법 및 누수저감 방법은 상수도관망 최적관리시스템 구축사업, 지방상수도 현대화사업, 유수율 제고 사업의 주요 공종으로 반영되었으며 이러한 공종의 효율적인 투입을 위해 유수율 제고 공종의 영향인자를 분석하기 위한 많은 연구들이 이루어졌다.

Kim et al. (2007)은 정읍시 지방상수도 유수율 제고 전략을 제시하고 수압관리, 누수탐사 및 복구, 급배수관망정비, 계량기교체 등의 이행에 따른 유수율 제고 효과를 분석한 바 있다. Kim, (2012)은 태백권 지역의 상수도관망 최적관리시스템 구축사업의 누수저감방법별 투입비용과 누수저감효과를 분석하여 경제성 최적화 모델을 개발한 바, 연구대상지역에서는 감압밸브설치를 사업우선순위에 두어야 함을 제시한 바 있다. Lee, (2013)는 영월, 정선지역의 상수도관망 최적관리시스템 구축사업의 영향인자별 단위공사비를 산정하여 계량기교체, 누수탐사 및 복구, 인입급수관교체, 송배수관교체 순으로 경제적 투자우선순위를 제시하였으며 유수율 제고 영향인자에 대해 중회귀분석을 실시하여 유수율증가율에 대한 다중회귀식을 산정하였다.

좀 더 장기적이고 경제적인 개념이 고려된 연구로는 Koo et al. (2011)이 경제적 누수관리 목표산정을 위해 유수율 제고 사업화 단계와 관망운영단계로 구분하여 각각의 누수저감방법을 제시하고 누수저감방법별 비용편익분석을 통해 단기경제적, 장기경제적 누수관리목표를 결정하였다. Cho, (2013)는 단위 활동별 투자대비 무수수량(NRW, Non-Revenue Water) 감

소 효과는 노후관 개·대체, 블록구축, 누수탐사 및 복구, 계량기교체, 수압관리 순으로 큰 것으로 제시하였으며, 유수율과 노후관 비율이 절대적인 관계가 아님에 따라 관로 개·대체 활동은 장기적인 경제적 누수수준(ELL, Economic level of leakage)으로 분류할 것을 제안하였다.

다중의사결정에 의해 물손실관리 수단들의 우선순위를 정의하는 연구들도 있다. Mutikanga, (2012)는 물손실관리를 위한 정책적 계획수단을 제시하고 다중기준 의사결정 분석(MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis)의 하나인 우선순위조직화방법(preference ranking and organization method for enrichment evaluation, PROMETHEE)을 사용하여 연구대상지역에는 배급수관로 교체 및 압력관리가 우선적으로 수행되어야 함을 제시하였다. Troyan과 Morais(2015)도 물손실을 줄이기 위한 유지관리 의사결정 모델을 개발하기 위해 다중 기준 의사결정 분석의 하나인 실현성 기준 선택제거방법(elimination et choice translating reality, ELECTRE)을 사용하여 유지관리 수단들의 적용우선순위를 제시하였다.

유수율 제고방법의 영향인자에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으나 이 영향인자를 고려한 적정사업비 산정에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

2.3 유수율 제고 사업비 산정 방법

국내에서 과거 수행된 상수도관망 최적관리시스템 구축사업, 지방상수도 현대화사업 등 유수율 제고 사



업의 사업비는 설계에 의하여 비용을 산정하는 것이 원칙이나 사업편의상 유수율 제고 공종별 단위물량당 단가를 이용하여 공종별 사업비를 산정하고, 이를 집계하여 개략사업비로 활용하고 있다. 상수도관망 최적관리시스템 구축 및 유지관리 표준업무처리지침(MOE, 2010)에서는 사업비 추정방법으로 현재 유수율, 현재 유수율, 목표 유수율에 대한 조건표를 이용한 방법을 제시하였으며, 조건표 작성의 근거 공식으로 유수율과 단위(저감누수량/유수율)당 사업비 관계식을 다음 Eq. 1과 같이 제시한 바 있다.

$$y = 1.08 \times e^{0.075x} \times 1.5 \quad (1)$$

여기서, y : 단위(저감누수량(m^3 /일)/유수율(%))당 사업비(백만원/(m^3 /일)/%)
 x : 유수율(%)

Eq. 1은 2009년 기준 K-water의 12개 지방상수도에 대한 운영효율화 사업에 대하여 사업비 투자 대비 유수율 제고에 대한 추세분석으로부터 도출한 것으로 실제 사업비에 대한 추세분석 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 결과를 바탕으로 지방상수도 운영효율화사업에서 고려하지 못한 부대사업비 및 사업관리비 등

을 반영하기 위해 Eq. 1과 같이 1.5를 할증계수로 적용하도록 하였다.

Eq. 1로부터 특정 유수율 제고 사업의 개략사업비를 산정하기 위해서는 현재유수율에서 목표유수율까지의 단위(저감누수량/유수율)당 사업비와 저감누수량의 적산값을 구하여야 하나 실무적으로는 직접 적분하는 것이 곤란하므로 다음의 대안을 사용할 수 있다. 첫째, 현재유수율부터 목표유수율까지 1% 단위로 구분한 후 각각의 단위(저감누수량/유수율)당 사업비와 저감누수량의 곱한 값을 현재유수율부터 목표유수율까지 적산하면 개략 사업비를 산정할 수 있다. 둘째, 이 방법도 절차가 복잡하므로 상수도관망 최적관리시스템 구축 및 유지관리 표준업무처리지침(MOE, 2010)에 간략제시된 표를 사용하여 보간산정할 수 있다.

3. 연구방법

본 연구에서는 중회귀 분석을 활용하여 관로 노후화, 관망 유지관리 여건, 유수율 변동 등과 유수율의 관계를 분석하고, 분석결과를 토대로 유수율 제고 사업의 성과지표로 유수율 외의 추가적인 지표활용의 필요성을 검토한다.

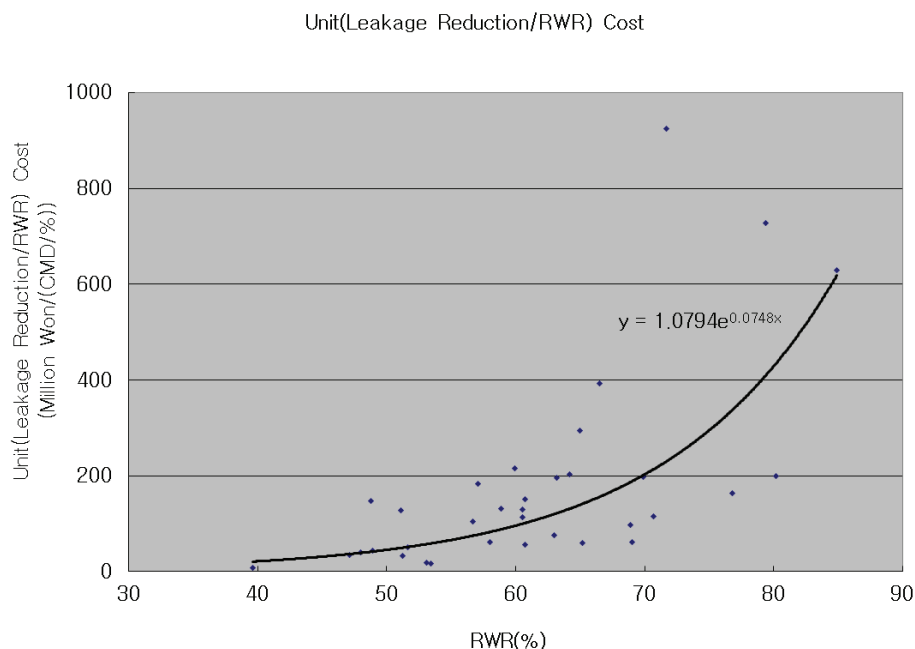


Fig. 3. Unit cost by leakage reduction/RWR(MOE, 2010).

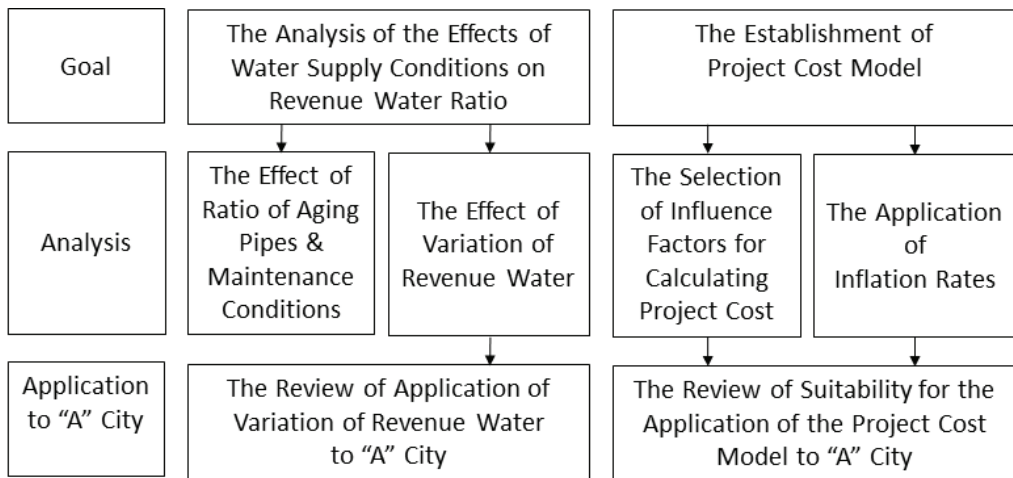


Fig. 4. Schematic diagram of this study.

또한 과거 유수율 제고 사업을 대상으로 개략 사업비 산정을 위한 모델을 개발하고, 실제 유수율 제고 사업이 수행되었던 A시를 대상으로 사업비의 적정성을 검토한다. 본 연구에서의 다양한 요인의 유수율 영향 검토 및 적정사업비 산정모델 개발에 대한 연구흐름은 다음 Fig. 4와 같다.

3.2 급수지역 여건변화에 따른 유수율 변동 특성 분석

본 연구에서는 관로 노후화, 관망 유지관리 여건이 유수율에 미치는 영향과 유수수량 변동이 유수율에 미치는 영향을 분석한다.

관로 노후화와 관망 유지관리 여건이 유수율에 미치는 영향 분석을 위해 2019년 전국 상수도통계 자료를 기초 데이터로 활용하여 중회귀 분석을 수행하였다. 중회귀 분석 시 Table 1과 같이 특·광역시 여부,

시지역 여부, 군지역 여부 등 범주형 변수와 관로 노후화 및 관망 유지관리 여건을 정량적으로 반영할 수 있는 지표인 경년관 비율, 총관로연장 당 유지관리비, 경년관로 연장 당 유지관리비, 누수량 당 유지관리비 등 4개의 척도형 변수를 독립변수로 설정하고, 유수율을 종속변수로 설정하였다.

관로 노후화 및 관망 유지관리 여건과 유수율의 관계를 모델화 하기 위한 중회귀 분석은 전국 161개 수도사업자 전체 데이터를 활용하여 통계적으로 유의한 모델을 도출하여, 일반적인 경향성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

한편, 본 연구에서는 누수사고 등 이벤트성 유수율 변동요인이 발생하지 않는다고 가정할 경우, 유수수량 변동이 유수율에 어느 정도 영향을 미치는지 정량화하기 위하여 A시를 대상으로 다음 Eq. 2에 따라 유

Table 1. Variables to analyze the relationship between water supply area condition and RWR

Variable	Water supply area condition	Unit	Variable Type
Independent Variable	Metropolis	-	Categorical Variable (Yes=1, No=0)
	City		
	County		
	Aging Pipe ratio	%	Scale Variable
	Maintenance Cost by Total Pipe Length	Thousand Won/m	
	Maintenance Cost by Aging Pipe Length	Thousand Won/m	
	Maintenance Cost by Leakage	Thousand Won/m ³	
Dependent Variable	Revenue Water Ratio	%	



수수량이 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 배 증가하는 경우, 유수율의 증가를 분석하여 유수수량 변화가 유수율 증가에 미치는 영향을 정량화하여 제시한다.

$$y = Q_r / Q_s = Q_r / (Q_r + Q_l) \quad (2)$$

여기서, y : 유수율
 Q_r : 유수수량
 Q_s : 공급량
 Q_l : 누수량(단일값으로 가정)

3.3 적정 유수율 제고 사업비 산정모델 개발

본 연구에서는 사업비 구성내역 및 공사내역을 활용하여 사업물량 또는 세부 비용에 따른 적정 사업비 모델을 개발하기 위하여 실제 유수율 제고 사업이 수행되었던 20개 지자체의 사업 공종별 사업비 구성내역을 다음 Table 2와 같이 수집하였다.

사업의 주요 공종으로 관망정비, 누수탐사 관로연장, 누수수리 개소를 영향인자로 규정하고, 20개 지자체의 사업 수행에 따른 목표 누수저감량, 관망정비 관로연장, 누수탐사 및 수리에 대한 공사 내역 자료를 토대로 다음 Table 3과 같이 정리하였다.

본 연구에서는 최적 적정사업비 산정모델을 도출하기 위하여 사업비를 종속변수로 할 때, 다양한 형태의 사업 내용을 독립변수로 고려한다. 이에 따라 Table 3에서는 독립변수로 활용한 수 있는 인자로서 누수탐사 관로연장, 누수수리 개소수 뿐 아니라 누수탐사 관로연장과 누수 수리 개소수의 합산값을 산정하였다. 또한 누수탐사 관로연장당 사업비 단가가 누수 수리 개소당 사업비용 단가와 비교하여 0.36 배임을 고려하여 누수 탐사 관로연장에 0.36을 곱한 후 누수 수리 개소수를 합산한 값을 추가적인 독립변수로 산정하여 적정사업비 산정 모델 개발에 활용하였다.

이에 따라 종속변수를 유수율 제고 사업비로 하고, 독립변수를 사업 내용과 관련항목으로 하는 합리적인

Table 2. Collection data on RWR improvement project costs in 20 counties

District	Total Project Cost	RWR Improvement Item Cost (Unit : million Won)			
		Pipe Replacement	Leakage Detection & Repair	Other Works	supplementary Works
county 1	25,419	17,202	2,928	4,586	703
county 2	24,135	16,859	1,798	4,752	726
county 3	16,787	10,754	1,431	3,990	612
county 4	23,405	14,684	1,456	6,581	684
county 5	30,377	20,869	4,028	5,387	93
county 6	22,809	15,679	2,926	4,131	73
county 7	17,922	12,264	1,976	3,618	64
county 8	16,195	10,427	2,228	3,488	52
county 9	17,015	11,323	2,094	3,543	55
county 10	17,213	11,684	1,920	3,551	58
county 11	24,336	16,688	3,488	4,092	68
county 12	16,662	11,790	1,736	3,084	52
county 13	12,620	8,472	1,272	2,830	46
county 14	11,567	8,643	792	2,095	37
county 15	14,742	10,602	796	3,295	49
county 16	23,708	17,449	2,500	3,692	67
county 17	15,700	10,751	1,290	3,610	49
county 18	15,598	10,869	2,418	2,267	44
county 19	12,720	7,743	1,410	2,758	809
county 20	18,080	13,610	1,929	1,805	736

Table 3. Details of RWR improvement project costs in 20 counties

District	Target Leakage Reduction (m ³)	Pipe Replacement (km)	Leakage Detection & Repair			
			Leakage Detection (km)	Leakage Repair (EA)	Leakage Detection(km) + Leakage Repair(EA)	0.36×Leakage Detection(km) + Leakage Repair(EA)
county 1	2,283.5	52.6	756	708	1,464	980
county 2	2,375.4	49.1	464	435	899	602
county 3	2,036.1	35.9	357	358	715	487
county 4	4,054.3	46.78	360	368	728	498
county 5	2,148.1	75.1	1,007	1,007	2,014	1,370
county 6	1,158.0	63.1	769	694	1,463	971
county 7	1,233.8	41.1	494	494	988	672
county 8	742.4	40.4	557	557	1,114	758
county 9	1,356.3	38.8	523	523	1,046	711
county 10	1,696.7	39.3	480	480	960	653
county 11	827.6	65.0	872	872	1,744	1,186
county 12	673.5	34.8	434	434	868	590
county 13	1,155.4	30.5	318	318	636	432
county 14	594.1	21.3	198	198	396	269
county 15	1,200.3	21.7	222	176	398	256
county 16	1,495.3	46.7	625	625	1,250	850
county 17	723.0	56.6	184	600	784	666
county 18	1,106.8	48.0	258	980	1,238	1,073
county 19	2,040.6	27.9	309	500	809	611
county 20	1,219.2	43.4	500	500	1,000	680

모델을 개발하고자 독립변수를 달리하는 시나리오, 각 지자체별 사업 수행 시기를 고려하여 사업비에 대하여 물가상승률을 고려하는 시나리오, 독립변수중 누수저감량을 사업 전 계획치 또는 사업 후 실제 달성치를 고려하는 시나리오 등 크게 3가지로 구분하여 최적 적정사업비 모델을 개발하였다. 시나리오별 결과를 비교하여 최적 모델을 도출하고자, 각 시나리오에 대하여 다음과 같이 정의 하였다.

우선적으로 다음 Table 4와 같이 독립변수의 종류에 따라 시나리오를 숫자로 구분하였다.

한편, 각 지자체마다 사업시기가 상이하여 종속변수인 각 사업비를 현재가치로 재환산하는 것이 필요할 것으로 판단하였다. 따라서 개별 사업의 공사시작 시점부터 현시점까지의 물가상승률을 고려하여 Table 5와 같이 사업비에 해당하는 종속변수에 물가상승률을 고려하지 않는 경우는 시나리오 A, 물가상승률을 고려하는 경우는 시나리오 B로 구분하였다. 이때, 물

가상승률을 고려하기 위하여 Table 6에 나타난 KOSTAT(2020)이 제시하는 소비자물가총지수를 활용하여 개별 사업비를 동일 시점의 가치로 재환산함으로써 시나리오 B에 따른 모델 개발을 실시하였다.

Table 4, Table 5에 따른 종속변수와 독립변수 시나리오별로 적정사업비 모델을 개발하였으며, 개발된 모델에 대하여 독립변수 입력값 변화에 따른 종속변수 변화를 논리적으로 검토하여 적정 모델을 선정하였다.

한편, 계획 대비 실제 사업에 따른 누수저감량을 고려함으로써 모델에 따른 사업비의 적정성을 판단하기 위하여 물가상승률 고려한 사업비 자료들을 모델 개발에 활용함과 동시에 독립변수로서 고려하는 누수저감량을 사업계획시 목표한 저감량을 적용하는 경우와 사업종료 후 실제 누수저감량을 고려하는 경우로 구분하여 다음 Table 7과 같이 시나리오 C를 설정하였다.



Table 4. Independent variables scenario considering RWR improvement project details

Scenario No.	Independent variables considering RWR improvement project details
1	① Target Leakage Reduction(Thousand m ³) ② Pipe Replacement Length(km) ③ Leakage Detection Length(km) ④ Leakage Repair(EA)
2	① Target Leakage Reduction(Thousand m ³) ② Pipe Replacement Length(km) ③ Leakage Detection Length(km) + Leakage Repair(EA)
3	① Target Leakage Reduction(Thousand m ³) ② Pipe Replacement Length(km) ③ 0.36 × Leakage Detection Length(km) + Leakage Repair(EA)

Table 5. Scenario for considering inflation rate for RWR improvement project cost

Scenario	Inflation rate for RWR improvement project cost
A-1, A-2, A-3	Inflation rate not considered
B-1, B-2, B-3	Convert to present value in consideration of inflation rate

Table 6. Consumer prices total index(KOSTAT, 2020)

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Consumer Prices Total Index	91.1	94.7	96.8	98.0	99.3	100.0	101.0	102.9	104.5	104.9	105.4

Table 7. Scenario for the estimation of proper RWR improvement project cost estimation model

Scenario	Target Leakage Reduction
C1	Initial Water Supply × (Target RWR - Initial RWR)
C2	Current Real Leakage Reduction

최종적으로 개발된 모델을 활용하여 실제 유수율 제고 사업이 수행되었던 A시에 Table 7에서 제시하는 시나리오 C를 적용하여 사업비 적정성을 검토하였다.

수로 하는 회귀분석을 실시하였다. 중회귀 분석 시 독립변수의 선택은 단계선택법을 활용하였고, 다음 Eq. 3, Fig. 5, Table 8과 같이 최종적으로 통계적으로 유의한 모델을 도출하였다.

$$y = 78.242 - 11.294X_1 + 0.276X_2 - 0.198X_3 + 8.847X_4 \quad (3)$$

4. 연구결과

4.1 급수지역 여건변화에 따른 유수율 변동 분석

관로 노후화와 관망 유지관리 여건이 유수율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2019년 기준 전국 161개 지자체를 대상으로 특광역시, 시지역, 군지역 여부에 대한 더미변수, 경년관 비율, 총 관로연장당 유지관리비, 경년관로 연장 당 유지관리비, 누수량 당 유지관리비 등 관로 노후화 및 관망 유지관리 여건을 나타내는 변수를 독립변수로 하고, 유수율을 종속변

여기서, y : 유수율 (%)
 X_1 : 군지역 여부(yes=1, no=0)
 X_2 : 총 관로연장 대비 유지관리비 (천원/m)
 X_3 : 경년관 비율 (%)
 X_4 : 특·광역시 지역 여부 (yes=1, no=0)

Table 8. Multiple regression analysis result to analyze the relationship between regional condition and RWR

Item	Non-standardization Coefficients		Standardization Coefficient	t	Significant Probability	covariance Statistics	
	B	Standard Error	Beta			Tolerance	VIF
Const.	78.242	2.069		37.818	.000		
X ₁	-11.294	1.775	-.434	-6.364	.000	.511	1.958
X ₂	.276	.054	.336	5.141	.000	.723	1.383
X ₃	-.198	.061	-.193	-3.246	.001	.937	1.067
X ₄	8.847	3.532	.148	2.505	.013	.522	1.914

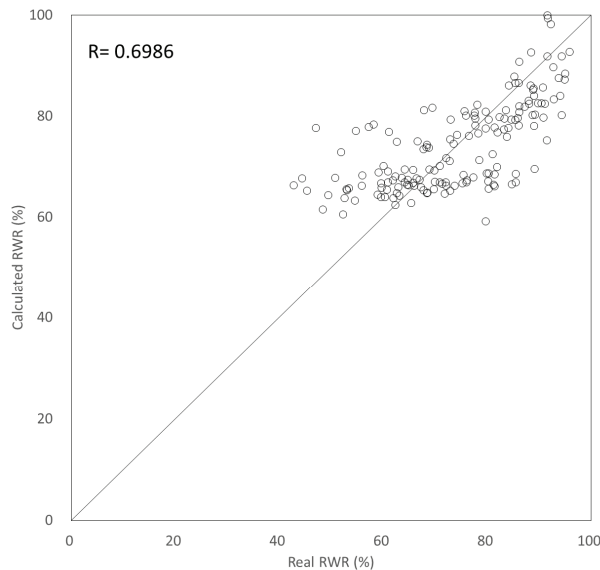


Fig. 5. The result of correlation analysis between real RWR and calculated RWR.

최종적으로 도출된 모델에서는 Table 8에 나타낸 바와 같이 공차한계와 VIF값을 토대로 군지역 여부 (X₁), 특광역시 여부(X₄) 등 2개의 범주형 변수와 총 관로연장 대비 유지관리비(X₂), 경년관 비율(X₃) 등 2개의 척도형 변수가 다중공선성에 문제가 없는 것으로 선택되었다. 또한 각 변수에 대한 계수들 또한 유의확률이 0.05 이하이므로 통계적으로 유의하다 할 수 있다. 다만, Fig. 4와 같이 본 중회귀 모델 개발에 활용된 실제 우수율과 추정된 우수율간의 상관계수가 0.6986임을 고려하였을 때, 회귀모델은 매우 정확한 예측보다는 우수율 변동의 경향성을 판단하기 위해 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 8에 나타낸 표준화 계수를 근거로 우수율 변동에 영향이 큰 순서대로 독립변수를 나열하면 군지

역 여부, 총 관로연장 대비 유지관리비, 경년관 비율, 특광역시 지역 여부 순으로 나타났다. 또한 비표준화 계수 값을 분석한 결과, 군지역은 총 관로연장 대비 유지관리비와 경년관 비율이 동일한 시지역과 비교하여 일반적으로 11.29%p 낮은 우수율을 갖고, 특광역시는 일반적으로 8.84%p 높은 우수율을 갖는다고 할 수 있다. 특·광역시 지역, 시 지역, 군 지역 등 동일한 행정구역 단위에 속하는 지자체 간 비교할 경우 총 관로연장 대비 유지관리비가 1천원/m 더 높을수록 0.276%p 만큼 우수율이 높게 나타나며, 경년관 비율이 1%p 만큼 더 많을수록 0.198%p 만큼 우수율이 낮게 나타나는 경향을 갖는다. 즉, Eq. 3 및 Table 8은 관로 노후화 정도 및 관망 유지관리 여건이 열악할수록 낮은 우수율을 갖는다는 것을 보여준다. 이와 같은 중회귀 분석 결과는 경년관 비율을 개선할 수 있는 노후 상수관망 정비 사업이 수행되지 않고, 관로의 유지관리를 위한 투자가 지속되지 않는다면 우수율이 저하될 우려가 있음을 시사한다.

한편, 지자체 A시를 대상으로 우수수량 변동에 따른 우수율 변화를 분석하였다. A시의 현시점 우수수량과 공급량을 기준으로 수량에 변동을 줄 수 있는 이벤트는 없고 누수량은 일정하다고 가정된 후, 현재 우수수량 대비 증감에 따른 우수율 변화를 산정한 결과, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 대수함수 형태의 변화를 갖는 것으로 나타났다.

17,150 m³/d의 수돗물을 공급하는 A시는 다음 Table 9와 같이 평소유량대비 40%가 증감하는 경우의 우수율은 각각 6.00%p, -11.02%p 변동하는 것으로 추정되었다. 이처럼 동일한 관망조건이라 하더라도 계절적 요인, 인구적 요인에 의해 우수수량의 변동이 발생하면 우수율이 변동될 수 있음을 확인할 수 있다. 이에 따라 우수율 제고 사업의 성과지표로써 사업 내용 외



Table 9. RWR variation according to revenue water variation (A city)

Status	Revenue Water (m ³ /d)	Supply Water (m ³ /d)	Leakage (m ³ /d)	RWR (%)	RWR Variation (p)
40% Decrease	7,573	12,101	4,528	62.58	-11.02
Current Status	12,622	17,150	4,528	73.60	
40% Increase	17,670	22,198	4,528	79.60	6.00

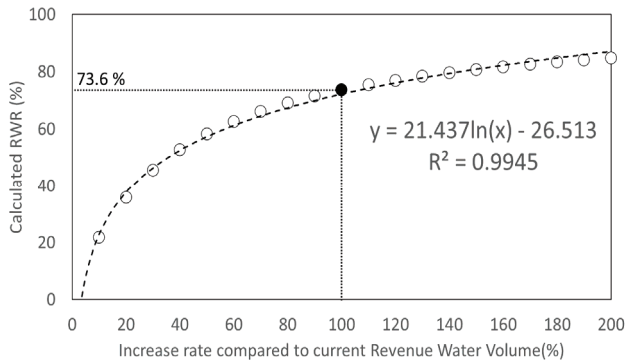


Fig. 6. RWR variation according to increase rate of revenue water volume.

적 요인에 의하여 영향을 받을 수 있는 유수율 뿐 아니라 추가적인 지표를 활용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

4.2 적정 유수율 제고 사업비 산정 모델 개발

국내 20개 지자체에서 수행된 유수율 제고 사업의 내용과 사업비용 자료를 토대로 사업비에 대하여 사업 수행시기에 따른 물가상승률을 고려하지 않는 시나리오 A와 물가상승률을 고려하는 시나리오 B에 따라 적정 유수율 제고 사업비 산정모형을 개발한 결과는 Table 10, Fig. 7과 같다.

Table 10, Fig. 7에 나타난 바와 같이 모든 시나리오에서 결정계수는 0.75 이상으로 높게 나타났으며, 시나리오 A-1과 B-1에 의해 도출한 회귀모형은 결정계수는 각각 0.913, 0.909로 시나리오 A와 B에서 도출한 회귀모형 중 가장 높은 값을 나타낸다. 다만, 4번째 독립변수인 누수수리 개소(X_4)의 회귀계수가 음수(-)값으로 산정됨에 따라 누수수리 예정 개소수가 많을수록 사업비를 줄어드는 논리적인 오류가 발생한다. 따라서 시나리오 A-1에 의한 회귀모형은 적정 사업비를 검토하기에는 부적절한 모형으로 판단된다.

또한, 시나리오 A-2, B-2는 논리적 오류는 발생하지 않으나, 독립변수 중 누수탐사 및 수리를 합산한 값을 변수로 활용하며, 단위가 다른 관로연장과 개소에 대하여 동일한 가중치를 적용함에 따라 사업비 자체가 다소 과대하게 산정될 수 있어, 현실적이지 못할 것으로 판단된다.

논리적 오류가 없고, 누수탐사 및 수리와 관련된 변수가 다른 시나리오와 비교하여 상대적으로 적용된 시나리오 A-3, B-3 모델이 적정 사업비를 산정하기에 가장 적절할 것으로 판단된다.

한편, 모델 개발 시 적용한 다양한 지역에서의 유수율 제고 사업 수행시기에 상이하여, 사업수행 시기에 따른 물가상승률을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 물가상승률을 적용한 시나리오 B-3의 모델과 물가상승률을 고려하지 않은 시나리오 A-3의 모델을 비교한 결과, 시나리오 B-3에 의한 모델의 결정계수가 시나리오 A-3과 비교하여 상대적으로 낮은 것으로 나타났으나, 물가상승률을 고려하여 현재가치로 환산하여 비교하는 것이 합리적이므로 B-3 시나리오의 모델을 기준으로 실제 A시에서 수행된 유수율 제고 사업의 사업비 적정성 검토에 활용하였다.

4.3 적정 유수율 제고 사업비 산정 모델을 활용한 사업비 적정성 검토

유수율 제고 사업을 추진한 A시 사업비의 적정성을 검토하기 위해 B-3 시나리오에 의한 모델의 입력변수로서 누수저감량에 대하여 기존 계획치를 입력하는 경우와 사업 종료후 달성치를 입력하는 경우 각각으로 구분되는 시나리오 C를 적용한 결과는 다음 Table 11과 같다.

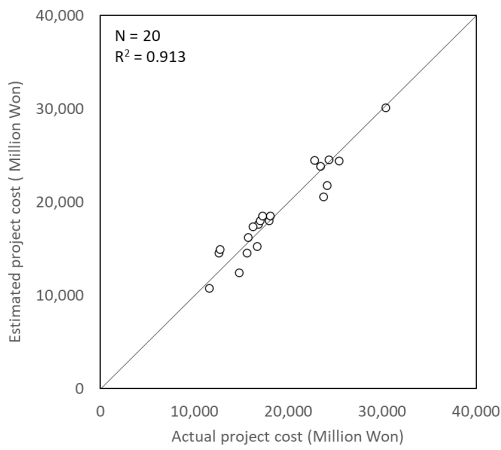
한편, 상수도관망 최적관리시스템 구축 및 유지관리 표준업무처리지침에서 제시하는 간략사업비 추정 방법과 비교하여 A시의 사업비의 적정성을 Table 12와 같이 검토하였다.

Table 10. Results of development of proper RWR improvement project cost estimation model by scenario A and B

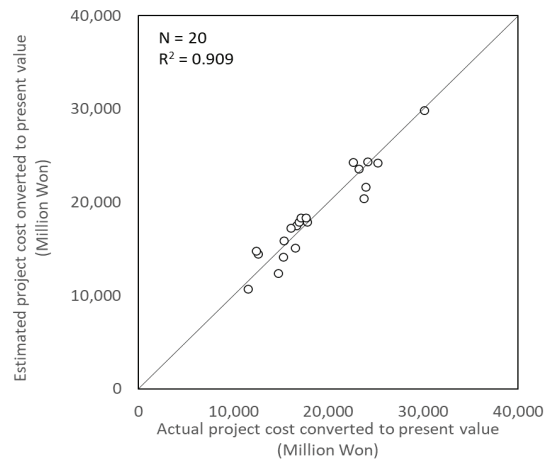
Scenario	Project Cost Model	R ²
A-1	$Y = 4043.9 + 1.9899X_1 + 198.03X_2 + 11.055X_3 - 4.1360X_4$ Where Y = Project Cost(Million Won) X ₁ = Target Leakage Reduction(Thousand m ³) X ₂ = Pipe Replacement Length(km) X ₃ = Leakage Detection Length(km) X ₄ = Leakage Repair(EA)	0.913
A-2	$Y = 3682.4 + 2.4125X_1 + 146.78X_2 + 4.9632X_3$ Where Y = Project Cost(Million Won) X ₁ = Target Leakage Reduction(Thousand m ³) X ₂ = Pipe Replacement Length(km) X ₃ = Leakage Detection Length(km) + Leakage Repair(EA)	0.839
A-3	$Y = 3503.770 + 2.252X_1 + 232.237X_2 + 2.442X_3$ Where Y = Project Cost(Million Won) X ₁ = Target Leakage Reduction(Thousand m ³) X ₂ = Pipe Replacement Length(km) X ₃ = 0.36 × Leakage Detection Length(km) + Leakage Repair(EA)	0.804
B-1	$Y = 4020.856 + 1.975X_1 + 193.991X_2 + 11.438X_3 - 4.439X_4$ Where Y = Project Cost converted to present value(Million Won) X ₁ = Target Leakage Reduction(Thousand m ³) X ₂ = Pipe Replacement Length(km) X ₃ = Leakage Detection Length(km) X ₄ = Leakage Repair(EA)	0.909
B-2	$Y = 3643.012 + 2.417X_1 + 140.424X_2 + 5.071X_3$ Where Y = Project Cost converted to present value(Million Won) X ₁ = Target Leakage Reduction(Thousand m ³) X ₂ = Pipe Replacement Length(km) X ₃ = Leakage Detection Length(km) + Leakage Repair(EA)	0.828
B-3	$Y = 3456.517 + 2.259X_1 + 230.871X_2 + 2.313X_3$ Where Y = Project Cost converted to present value(Million Won) X ₁ = Target Leakage Reduction(Thousand m ³) X ₂ = Pipe Replacement Length(km) X ₃ = 0.36 × Leakage Detection Length(km) + Leakage Repair(EA)	0.791

Table 12에 나타난 바와 같이 본 연구에서 개발한 적정 사업비 산정모델에 계획 누수저감량을 입력변수로 활용하는 경우 A시의 사업비는 581.51억 원으로 산정되었으나, 실제 사업비에 물가상승률을 고려하여 현가로 환산한 사업비는 546.36억 원으로 35.15억 원 과소 산정된 것으로 검토되었다. 하지만 실제 누수저감량을 입력변수로 활용하는 경우에는 11.75억 원이 추가 책정되어 당초 계획한 사업물량 및 목표 누수저감량 대비 사업비는 상대적으로 적정한 것으로 검토되었다.

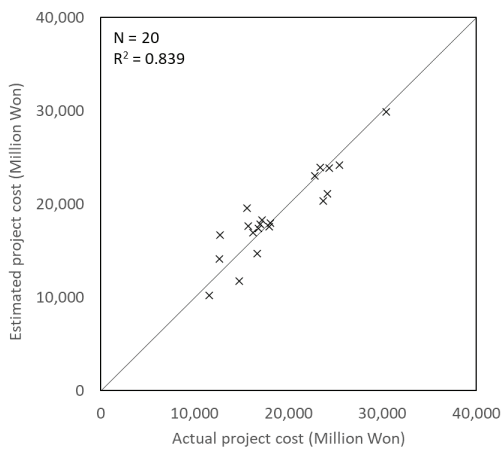
한편, 상수도관망 최적관리시스템 구축 및 유지관리 표준업무처리지침 간략사업비 추정방법을 적용하는 경우와 본 연구에서 개발한 적정 사업비 모델을 적용하는 경우를 비교한 결과, 기존 간략사업비 추정 방법은 유수율 및 누수저감량만을 사용하기 때문에 관로 정비, 탐사, 누수 수리 등 구체적인 사업물량을 고려하는 본 연구에서 개발한 사업비 산정 모델로 추정한 결과와 비교하여 사업비가 254.64억 원 적게 산정된 것으로 분석되었다.



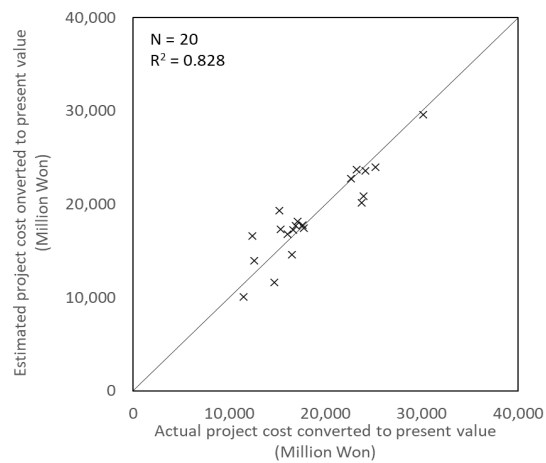
(a) Scenario A-1



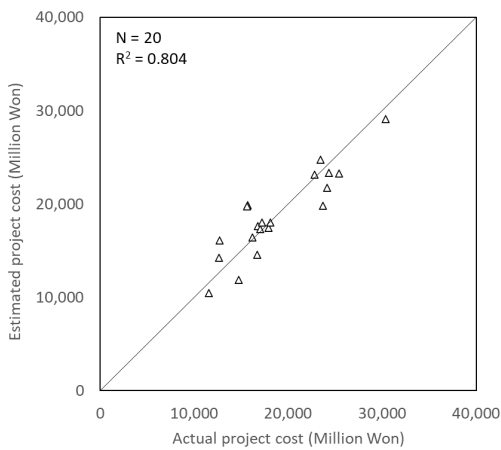
(b) Scenario B-1



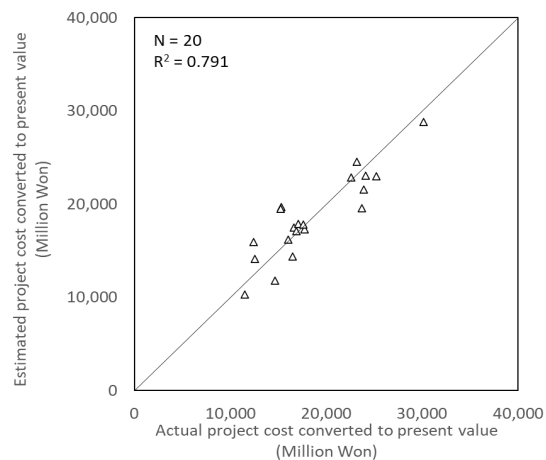
(c) Scenario A-2



(d) Scenario B-2



(e) Scenario A-3



(f) Scenario B-3

Fig. 7. Comparison results between actual and estimated project costs by proper RWR improvement project cost estimation models.

pp. 311-324
pp. 325-334
pp. 335-345
pp. 347-361
pp. 363-373
pp. 375-382
pp. 383-394
pp. 395-408
pp. 409-423
pp. 425-435
pp. 437-446
pp. 447-456

Table 11. Result of estimating the RWR improvement project cost in A city according to scenario C

Scenario	Target Leakage Reduction (Thousand m ³) (X ₁)	Pipe Replacement Length (km) (X ₂)	0.36×Leakage Detection(km) + Leakage Repair(EA) (X ₃)	Project Cost (Million Won) (Y)
C1 (Planned Target Leakage Reduction)	9,403	134	1,088	58,154
C2 (Current Real Leakage Reduction)	7,327	134	1,088	53,464

Table 12. Comparison of estimated project costs between existing model and the model developed in this study

Scenario	Project Cost (million Won)				Comparison (million Won)	
	actual project cost		estimated project cost		(B)-(A)	(B)-(C)
	2010	2020 (convert to present value) (A)	This Study (B)	MOE Guideline (C)		
C1 (Planned Target Leakage Reduction)	48,607	54,636	58,151	57,162	3,515	989
C2 (Current Real Leakage Reduction)			53,461	27,997	-1,175	25,464

5. 결 론

본 연구에서는 유수율제고 사업에서 목표유수율 달성이 사업수행자(시공사)의 의지와 상관없이 경년관비율, 유지관리여건, 유수수량 등 급수지역의 여건변화에 따라 영향을 받는 경우에 대하여 환경적·운영적·경제적 요인과 유수율 간의 관계를 분석하여 제시하였고 이러한 누수 절감과 같은 유수율 제고와 관련된 사업내용을 고려한 사업비 적정성을 검토하였다.

첫 번째로, 관로 노후화와 상수도관망 관리여건이 유수율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 중회귀분석을 실시한 결과, 관로 연장당 유지관리비, 행정구역(특·광역시, 시 지역, 군 지역) 구분, 경년관비율의 증가가 유수율에 영향이 있는 것으로 판단할 수 있었다. 이러한 결과는 적정 유지관리 비용이 투자되지 않고, 경년관 비율을 개선할 수 있는 관로 교체 사업이 수행되지 않는 경우 유수율이 감소할 수 있음을 의미하며, 일정기간 동안 일회성의 유수율 제고 사업의 수행이 아니라 유지관리비 투자, 경년관 비율 저감을 위한 활동을 지속해 가야 함을 의미한다.

두 번째로, 동일한 상수관망을 가지더라도 계절적 요인, 인구 요인 등에 의하여 유수수량의 변동이 발생할 수 있으며, 이는 유수율 제고와 관련된 사업 종료 후 유수율 측정시 영향을 미칠 수 있다. 지역적인 여건에 따라 유수수량 증감의 정도 또한 달라져 유수율 변동의 정도는 지역별로 상이할 것으로 판단되며, 본 연구에서 적용한 방법론을 활용하여 특정 지역에 대한 유수수량 변동에 따른 유수율 변동 정도를 정량적으로 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

세 번째로, 본 연구에서 개발한 적정사업비 산정 모델을 활용하여 A시의 사업비에 대한 적정성을 검토한 결과, 목표 유수율 달성을 위한 적정 사업비는 581.51억 원으로 산출되어 실제 사업비 486.07억 원과 비교하여 95.44억 원이 적게 계상된 것으로 나타났으나, 실제 사업비에 물가상승률을 고려하여 현가로 재환산하여 비교하는 경우에는 실질적으로 35.15억 원이 과소 계상된 것으로 판단된다. 상수도관망 최적관리시스템 구축 및 유지관리 표준업무처리지침 간략사업비 추정방법을 적용한 결과 또한 9.89억 원 과소 계상된 것으로 분석되었으며 이것은 목표유수율 상향에 따른



영향인 것으로 분석된다. 한편, 본 연구에서 개발한 적정사업비 모델로 추정된 사업비가 상수도관망 최적관리시스템 구축 및 유지관리 표준업무처리지침 간략사업비 추정방법을 활용하는 경우보다 크게 산정되는 것은 지방상수도 현대화사업이 상수도관망 최적관리시스템 구축사업을 분석하여 추가반영 사업비에 대한 보완 및 현실화를 고려했기 때문인 것으로 분석된다.

결론적으로 경년관비율, 유지관리여건, 유수수량 변동 등으로 인해 유수율은 영향을 받을 수 있어 노후 상수도관망에 대한 정비가 지속적으로 필요하다.

이와 같은 유수율 제고 사업의 성과지표로써 유수율 외에도 사업 내용과 직접적으로 연계되는 관로정비율, 사업 결과에 따라 개선될 것으로 기대되는 누수지수(ILI, Infrastructure Leakage Index), 사업 외적 영향을 고려하여 보정한 유수율 등을 추가로 활용하는 것이 타당하다. 또한 유수율 제고 사업 사업비 산정 시 단순히 사업 내용으로써 관로 정비, 탐사, 누수 수리 등의 연장, 개소 등 물량을 고려할 뿐만 아니라 누수 저감량 등과 같이 유수율 제고와 관련된 실질적인 사업 내용을 고려하는 것이 타당하다.

References

- Alegre, H., Baptista, J.F., Jr, Cabrera, F., Duarte, P., Himer, W., Merkel, W., and Parena, R. (2000). Performance Indicators for Water Supply Services, IWA Publishing.
- Cho, H.Y. (2013). Study for Assessing Economic Level of Leakage(ELL) and Setting Management Target, Master's Thesis, Changwon National University, Changwon, Korea, 62-63.
- Fanner, P., Thornton, J., Liemberger, R., and Sturm R. (2007). Evaluating water loss and planning loss reduction strategies, AWWA Research Foundation, AWWA, IWA.
- Kim, D.H., Lee, J.S., and Han, S.K. (2007). "Analysis on the non-revenue water reduction of jeongeup local government water supply system", *Academic Conference for Korean Society of Civil Engineers*, 10-13 October, 2007, Daegu, Republic of Korea, Korean Society of Civil Engineers.
- Kim, T.G. (2012). A study on cost benefit analysis optimization model for water distribution network rehabilitation project of taebaek region, Master's thesis, University of Seoul, 105-107.
- Koo, J.Y., Park, S.H., Choi T.H., Kim, J.H., Seo, N.C., Lee, S.W., Cho, S.H, Sin, H.S., Choi, H.S., Hong, M.J., and Kang, K.H., K-water, (2011). A basic study for establishment of setting objective for leakage management of water pipe network, 189-191.
- Koo, J.Y., Hyun, I.H., Kim, D.I., Kim, M.C., Seo, J.W., Koo, M.S., Kim, J.W., Kim, K.B., Kim, H.G., In, S.Y., Yeo, Y.H., Lee, C.S., Chun, M.G., and Nam, Y.W., Ministry of Environment. and K-Water, (2015). A study on the development of performance measurement indicator for local waterworks management, 200-202.
- Lambert, A.O., Brown, T.G., Takizawa, M., and Weimer, D. (1999). A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems, *J. Water Supply Res. T.*, 48(6), 227-237.
- Lambert A.O. (2001). International Report on Water Losses Management and Techniques: Report to IWA Berlin Congress, *Water Sci. Technol. Water Supply*, 2(4), 1-20.
- Lee, J.M. (2013). A study on cost benefit analysis and leakage reduction prediction model for revenue water ratio enhancement project, Master's thesis, University of Seoul, 74-76.
- Ministry of Environment. (2010). Guidelines for Establishment and Maintenance of Optimal Water Distribution System, 70-71.
- Ministry of Environment. (2021). Manual for the modernization of local waterworks, 24.
- Ministry of Environment. (2019). Waterworks Statistics.
- Ministry of Environment. (2020). Waterworks Statistics.
- Mutikanga, H.E. (2012). Water loss management: Tools and methods for developing countries. Ph.D. thesis, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, 223-230.
- Rizzo, A., Vermerschm M., St. Hohn, S.G., Micallef, G., and Race, R. (2007). Apparent Water Loss Control:The Way Forward, *Water* 21, August 2007, 45-47.
- Statistics Korea. (2020). Consumer Prices Total Index.
- Troyan, F., and Morais, D.C. (2015). Maintenance Management Decision Model for Reduction of Losses in Water Distribution Networks, *Water Resour. Manage.*, 29, 3459-3479.