



목표 우수율 달성을 위한 우수율 제고 전략 산정 방법론 개발 및 적용

Development and application of methodology for calculating revenue water ratio improvement strategy to achieve target revenue water ratio

김동홍·김가영·손동완·최태호*

Donghong Kim·Gayoung Kim·Dongwan Son·Taeho Choi*

한국수자원공사

Korea Water Resources Corporation

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

ABSTRACT

This study set up the revenue water ratio that could be achieved within the range of the expenses of the water distribution network maintenance project, developed an analysis methodology that could estimate the additional project quantity to achieve the target revenue water ratio of 85% and applied and verified that to S. City. This methodology allowed the distribution of the leakage quantity for each leakage component by the pipeline through the total revenue water account balance analysis and BABE approach and the redistribution into the calculated leakage quantity more accurately through a step test. In addition, the level of reduction in leakage and the quantity of the project were estimated before and after the application of four strategies for the promotion of the revenue water ratio presented by IWA, according to the leakage components by the pipeline. As a result of the application of this analysis method to S. City, it would be possible to achieve up to the revenue water ratio of 81.0%, which was 74.7% in the beginning, if the water distribution network maintenance project was promoted within the range of the project expenses, and to achieve the revenue water ratio of 85.0%, the goal of the project, it would be necessary to replace the pipeline of 22.2% of the entire pipelines

Received 12 October 2022, revised 10 November 2022, accepted 23 November 2022.

*Corresponding author: Taeho Choi (Tel. : 042-870-7512, E-mail: choistarth@kwwater.or.kr)

• 김동홍(부장) / Donghong Kim (General Manager)

대전광역시 대덕구 신탄진로 200, 34350
200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Republic of Korea

• 김가영(연구원) / Gayoung Kim (Researcher)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34045, Republic of Korea

• 손동완(차장) / Dongwan Son (General Director)

대전광역시 대덕구 신탄진로 200, 34350
200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Republic of Korea

• 최태호(책임연구원) / Taeho Choi (Principal Researcher)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34045, 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.

in the target area. As a result of the re-estimation of the revenue water ratio achievable, applying the actual water distribution network maintenance quantity in the scope of the business with the results of this analysis, the revenue water ratio was 81.7% while the actually measured revenue water ratio was 82.3%. Thus, the reliability of this analysis method could be secured to some extent.

Key words: Target revenue water ratio, Leakage reduction, Pipeline management, Water pressure management, Leakage component analysis

주제어: 목표 유수율, 누수저감, 관망정비, 수압관리, 누수성분분석

1. 서 론

최근 심화하는 기후변화에 따른 가뭄발생률 증가와 용수수요 증가에 따라 물 부족 문제가 꾸준히 제기되고 있는 실정이며, 이로 인해 효율적인 수도물 공급에 대한 관심이 대두되고 있다.

이에 따라 환경부에서는 2017년부터 노후관 정비를 위한 지방상수도 현대화 사업을 추진 중이며, 획일적인 85% 유수율 성과목표가 설정되었다. 국내에서 유수율은 효율적인 수도시설 운영관리에 대한 주요 성과지표로 설정되고 있으나, 점차 유수율 지표에 대한 한계점이 명시되고 있다. Korea Water and Wastewater Works Association(KWWA) et al.(2015)에 따르면 유수율은 사용수량 증감 변화, 유효무수수량의 설정 영향, 장래용수 수요량 추정오차, 유수율 조작 사례 등과 같이 관리자의 의지와 무관한 영향을 받는다는 한계가 있어 지속적인 개선방안 마련의 필요성을 강조하고 있다. 또한, 유수율은 물 소비수준에 의해 기저 유수율 수준이 결정되는 경향을 가지고 있고, 인구증가 등에 의한 단순 사용량 증가로 인해 관리수준과 관계없이 유수율이 증가된다는 한계점이 지적되고 있다 (Kim and Choi, 2018). 특히, 유수율은 지형조건, 노후관 비율, 급수인구 대비 관망의 규모, 관리인력, 재정 규모 등에 따라 유수율 달성 정도가 다르게 나타나며, 이에 따른 지역별로 유수율의 큰 격차가 발생한다 (K-water, 2019).

유수율의 한계에 따른 해결점 제시를 위해 최근 Hwang et al. (2021)은 지방중소도시를 대상으로 자료 포락분석을 활용한 누수관리 효율성 평가방법을 제시하였다. 또한, K-water (2011)에서는 국외에서 제시하는 누수평가지표(Infrastructure leakage index, ILI), 경제적인 누수평가지표(Economic infrastructure leakage index, ELI), 경제적 누수수준(Economical level of leakage,

ELL)을 활용한 방법의 국내 실정 미반영에 따른 한계점을 제시하고, 국내실정에 맞는 경제적 누수관리목표 및 지표를 개발하여 제시하였다. 그러나 선행연구에서는 자료확보 등의 문제로 정밀한 적용의 한계가 나타났고, 지역의 여건(지형조건, 노후관 비율, 관망규모, 재정 등)을 고려하지 못하는 점에서 현실적인 적용이 어려운 실정이다.

본 연구에서는 대상지역의 급수 기초자료 및 관로 시설물에 관한 자료를 활용함으로써 자료확보의 한계점을 극복하고, 지역의 여건을 고려하여 유수율 제고 방안을 적용할 경우에 달성 가능한 목표 유수율 및 물량을 산출할 수 있는 방법론을 개발하여 관망정비 사업비 범위내에서 달성가능한 유수율 또는 목표 유수율 85% 달성을 위한 추가 사업물량을 산정할 수 있도록 하여, 이를 통해 현재 진행중인 유수율 제고 사업 또는 신규 유수율 제고 사업 등에 대한 계획수립, 평가 및 성과판정 등에 활용 가능한 목표 유수율 산정 및 유수율 제고 전략 산정 방법론을 제시하고 하였다.

2. 연구방법

2.1 이론적 배경

2.1.1 유수율 및 총괄수량수지 분석

유수율(Revenue water ratio, RWR)이란 정수장에서 생산된 총급수량 대비 정수생산량에 대한 요금징수수량(유수수량)의 백분율을 의미하며, 식 (1)과 같이 나타낸다 (Ministry of Environment, 2021).

$$\text{유수율}(\%) = \frac{\text{유수수량}}{\text{연간총급수량}} \times 100 \quad (1)$$

유수율이 향상될수록 유수수량이 증가함과 동시에



누수에 따라 수도요금으로 징수되지 못하는 손실량이 감소하여 경제적인 수도사업이 이루어진다. 이와같이 생산비용의 절감 등의 직접적인 효과와 간접적인 경영개선 효과를 파악할 수 있어 국내에서는 상수도 수량관리 평가를 위한 주된 평가지표로 활용되고 있다 (K-water, 2009).

유수율 산정을 위해 기준이 되는 총급수량을 구성하는 유수수량 및 무수수량 등과 같은 세부항목별 분석을 총괄 수량수지 분석(Total revenue water account balance analysis)으로 정의한다(K-water, 2009). 국내에서는 상수도 통계 작성시 총괄 수량수지 분석을 통해 급수구역 내에서 공급되는 총급수량을 사용 및 손실에 대한 세부성분으로 분류하여 분석한다(ME and K-water, 2015). 국내의 총괄 수량수지분석은 Table 1과 같이 국제적인 기준인 국제물협회(International water association, IWA)에서 제시한 수지분석(Water balance) 체계와 차이가 있다. 국내에서는 유수율을 주요 평가지표로 활용하는 만큼 유효수량 산정에 관해 세분화를 하였으나, IWA에서는 누수량 및 무수수량의 저감을 주요 목표로 수립하여 누수량에 관한 항목의 세분화를 통해 관리하고자 하였다.

본 연구에서는 총괄수량수지분석을 통해 총급수량을 사용량(검침량), 불감수량, 누수량으로 분류하고,

유수율 제고전략 반영에 따른 유수율을 산정하였다. 여기서 누수량을 Lambert et al. (1994)가 제시한 BABE (Background and burst estimate) 기술을 활용하여 누수성분을 배경누수량(Background losses)과 파열누수량(Bursts losses)으로 산정 및 분석하였다.

2.1.2 BABE 접근법

누수는 누수발생 특성에 따라 파열누수(Bursts losses)와 배경누수(Background losses)로 구분된다. 배경누수는 관의 연결부위(joint) 및 접합부(fitting)에서 발생하며, 누수량이 매우 적어 인지가 어렵다. 한편, 파열누수는 신고파열(Reported burst)과 미신고 파열(Unreported burst)로 구분되며, 이는 Lambert et al. (1994)가 제시한 BABE (Bursts and background estimate) 접근법에 의한 분류에서 신고와 미신고의 구분을 적용하여 처음 제시되었다.

실제 누수성분 계산을 위한 BABE 접근법은 국외의 여러 특정 연구에서 성공적으로 활용되었으며, 모델링 및 계산을 목적으로 세가지 범주로 실제 손실을 고려하였다. 세가지 범주는 다음과 같다.

- 감지불가능한 누출로 인한 배경손실(일반적으로 저유량 및 긴 지속시간)
- 보고된 누출 및 파열로 인한 손실(일반적으로 고

Table 1. Total revenue water account balance analysis of south korea and IWA (Kwater, 2011)

South Korea			IWA				
총 급수량	유효 수량	유수 수량	계량 요금수량	Billed metered consumption	Billed authorized consumption	Authorized consumption	Revenue water
			분수량				
			기타부과량				
		미계량 요금수량	Billed unmetered consumption				
	유효 무수 수량	수도사업용수량	Unbilled metered / unmetered consumption	Unbilled authorized consumption			
		공공수량					
		부정사용량			Unauthorised consumption		
	무효수량	계량기 불감수량	Metering inaccuracies	Apparent losses			
		조정감액수량	(not clear)				
		누수량	Leakage on transmission and/or distribution mains		Real losses	Water losses	
Leakage and overflows at utility's storage tanks							
Leakage on service connections up to point of customer metering							

pp. 319-327
pp. 329-337
pp. 339-349
pp. 351-362
pp. 363-375
pp. 377-390
pp. 391-402
pp. 403-411
pp. 413-425
pp. 427-437

유량 및 짧은 지속시간)

- 비보고된 파열로 인한 손실(일반적으로 보통유량이나, 지속시간은 누출제어 방법 및 강도에 따라 상이함)

관로 파손에 의해 발생하는 파열누수는 파손된 위치에 대한 인식과 위치 파악 및 복구 지속시간 인자에 의해 누수량이 산정된다. 파손에 의한 누수량은 육안, 탐지 및 신고 등으로 신속한 복구가 가능하며, 실시간 계측 유량자료의 증감 파악을 통해 소블록별 발생 파열 누수량의 정량화가 가능하다. 반면에, 배경누수량은 누수탐사작업을 통해서도 발견이 어려우며, 장기간 발생으로 인해 파열누수량에 비해 누수발생량이 크다. 이로 인해 수도사업자에 의한 효율적인 유수율 및 누수량 관리 저해원인 중 하나이다.

국외에서는 유수율 및 누수율과 같이 백분율을 이용한 지표의 한계점을 명심하고 있다. 사용수량 증감 변화, 유효무수수량의 설정 영향, 장래용수 수요량 추정오차, 유수율 조작 사례 등과 같이 관리자의 의지와 무관한 영향을 받는다는 한계점을 갖고 있어 지속적인 개선방안 마련의 필요성이 제기되어왔다(ME and K-water, 2015). IWA는 동일한 유수율 제고방법을 적용하더라도 지자체 여건에 따른 누수율 차이 발생이 가능하며, 관로길이, 급수인구, 평균수압 등과 같은 대상지역 현황에 따른 누수율의 기준 및 평가를 상이하게 수행하는 지표인 ILI (Infrastructure leakage index)를 제시하였다.

ILI는 현재의 연간실손실량(Current annual real losses, CARL) 대비 허용가능한 실손실량(Unavoidable annual real loss, UARL)의 비로 계산된다. CARL은 모든 종류의 누수, 파손, 수도관 월류, 급수관과 급수 연결점, 계량기로부터의 손실을 포함하며, 이는 새로운 누수 및 파손 발생과 기반시설 노후화에 의해 증가한다. UARL은 현재 시설여관과 수압상황에서 어떠한 노력으로도 제거 불가능한 허용 실손실량으로 앞서 설명한 BABE 접근법을 활용하여 Lambert et al. (1994)가 제시한 식 (2)을 통해 산정한다.

$$UARL = [A \times L_m + B \times N_c + C \times L_p] \times P \quad (2)$$

여기서, A는 배수관 계수, L_m 은 배수관 길이(km), B는 인입급수관 계수, N_c 는 급수전 수(connection), C는 옥내급수관 계수, L_p 는 옥내급수관 길이(km), P는 평균

운영 수압(m)이다.

본 연구에서는 Lambert et al. (1999)에서 일반적으로 양호한 상태의 사회기반시설(배수관, 급수전, 옥내급수관)에 대한 파열유량과 최소배경누수율이 공개된 국제 자료를 기반으로 산정한 매개변수 값을 활용하여 관로별 배경누수량을 산정하였으며, 총 누수량에서 배경누수량을 제한 값을 파열누수량으로 하여 관로별로 배분하였다.

2.1.3 유수율 제고 및 관리 전략

국내에서는 관로시설의 노후화, 체계적인 정비의 부족 등의 다양한 문제로 인해 유수율이 낮은 지역이 나타난다. 이에 관한 세부 원인은 복잡하게 매설되어 있는 배·급수 다발관이 다량으로 존재, 누수탐사 및 누수복구 등 관망관리의 인력 및 장비 부족 등의 전문성 결여, 미흡한 관로 시설물 자료관리, 복잡한 급수체계에 따른 공급량의 비효율적인 관리, 계량기 및 수용가의 관리 미흡 등이 있다. 특히, 지방상수도는 사업규모에 따른 여건 차이에 의한 영향을 많이 받는다. 사업규모가 큰 지방상수도 사업자의 경우, 독립채산제 원칙에 의해 큰 문제 없이 시설 투자와 서비스 품질이 개선되고 있다. 반면에, 중소도시의 소규모 사업자는 영세한 규모, 전문성의 확보실패, 시설 유지관리 부족 등의 문제로 지역간 요금 불균형이 분명하고, 경영, 시설, 요금회수 등의 문제를 자체적으로 해결하기 어렵다. 또한, 사업성과의 고착화로 인해 단순 시설 노후화 문제를 떠나서 경영문제 및 특수한 지방행정 문제로 인해 자체적 개선이 어려운 현실이다(Korea Research Institute for Human(KRIHS), 2016).

또한, 유수율 저하의 주요 원인인 누수는 다양한 원인에 의해 발생하는데, 과도한 수압 및 수압편차와 토양 조건, 관체 상태(부식, 재질)와 경과년도, 접합부의 불량 및 부실한 시공 등이 있다. 누수는 지속적인 감시와 역제가 되지 않는다면 복원하는 특성이 있어 단순 누수관리 측면에서 나아가 시설개선 측면까지 고려된 종합적인 유수율 제고 전략의 수립 및 추진이 요구되고 있다(K-water, 2009).

IWA의 Water Losses Task Force에서는 앞서 설명한 UARL과 CARL 개념을 통해 수압관리, 적극적인 누수탐사, 신속 및 정확한 누수복구, 적절한 노후관개 교체와 같은 4가지 방법을 활용하여 누수저감이 가능할



것이라 제시하였다.

본 연구에서는 이를 기반으로 유수율 제고방법을 직접적인 누수저감 효과 측정을 위해 1) 관망정비, 2) 누수탐사 및 복구, 3) 노후계량기 교체, 4) 수압제어로 한정하고, 누수성분 특성에 따라 저감가능 제고방법을 한정하여 적용하였다.

3.2 달성 가능한 목표 유수율 산정 절차

본 연구에서는 대상지역의 사업비를 고려하여 4가지 유수율 제고방법을 적용하여 달성가능한 유수율과 정비물량을 산정하고, 대상지역의 설정목표유수율 미달성시 추가 관망정비물량을 산정하였다. 또한, 실제

지역에 적용함으로써 검증하였다. 이를 위해 Fig. 1과 같이 총 5가지 산정 절차를 제시하였으며, 본 연구의 산정방법론에 따라 tool을 개발하여 적용하였다. 각 절차별 수행방법은 다음과 같다.

3.2.1 대상지역 설정 및 자료수집

대상지역은 국내에 위치한 도시지역 S군으로, 블록이 구축되어 있고, 단계시험이 완료되어 실적 데이터 취득이 용이한 지역을 선정하여 총 11개의 소블록을 대상으로 하였다. 자료수집 대상기간은 2020년 1월~6월이며, 이에 대한 검증을 위해 2021년 10월~2022년 3월의 자료를 수집하여 비교 및 검증하였다. 대상지

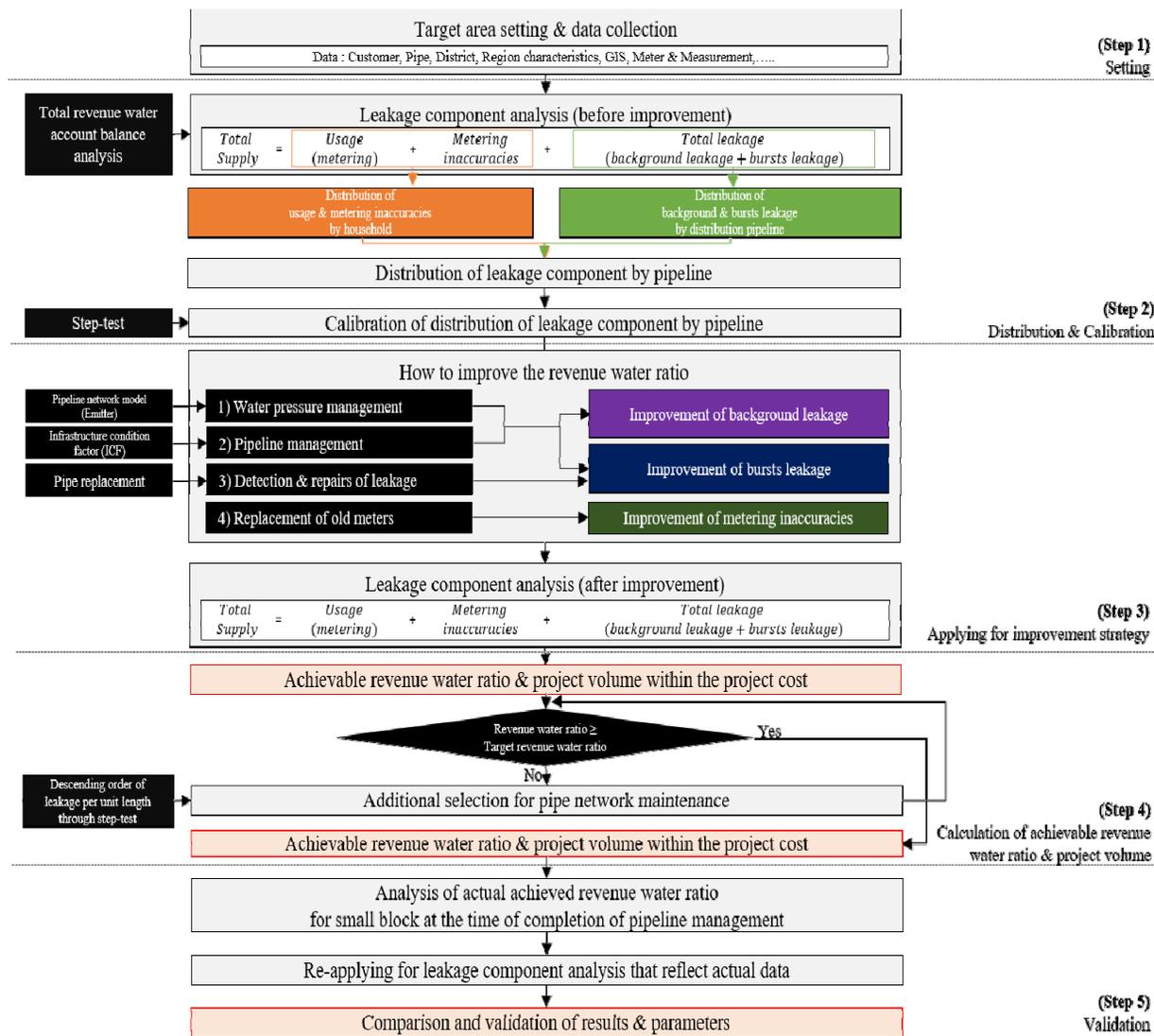


Fig. 1. The flow chart of this study.

pp. 319-327
pp. 329-337
pp. 339-349
pp. 351-362
pp. 363-375
pp. 377-390
pp. 391-402
pp. 403-411
pp. 413-425
pp. 427-437

역의 2020년 기준 상수도 급수인구는 16,415명이며, 급수 보급률 99.9%이다. 대상블록의 전체 상수도 관로 연장은 304.8 km, 급수전수는 5,031전이며, 유수율은 74.7%, 기존 감압밸브 개소수 2개소로 유수율 85%를 목표로 하고 있다. 도서지역 특성상 표고편차가 12.5~41 m로 크며, 급수구역이 분산되어있어 타 지자체에 비해 목표유수율 달성을 위한 고유특성 및 시설여건이 불리한 구조이다. 이에 대한 내용은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 달성가능한 목표유수율 산정을 위해 대상지역의 소블록별 수용가정보를 수집하였고, 그중 누수성분 분석을 위해 계측량, 배·급수관로, GIS, 감압밸브, 유량 및 수압 등의 자료를 대상기간에 대한 산술평균치를 활용하였다.

3.2.2 관로별 누수성분 배분 및 보정

(1) 누수성분분석 및 관로별 배분

관로별 누수성분분석을 위해 대상기간의 월별 공급량에 대한 유효수량(유수수량, 유효무수량), 무효수량에 대한 총괄수량수지분석을 시행했다. 총공급량은 유효수량과 무효수량의 합이며, 이 중 유효수량은 사용상 유효한 것으로 인정된 수량으로 유수수량과 유효수량의 합으로 구해진다. 유수수량은 유효수량 중 요금 부과된 수량으로 계량기요금수량과 미계량요금수량, 분수량, 기타부과량의 합으로 산정된다. 유효무

수량은 유효수량 중 수입이 없는 수량으로 계량기 불감수량과 수도사업용수량, 공공수량, 부정사용량의 합으로 산정된다. 이 중 계량기불감수량 산정 시 대상지역의 경우 대상기간 이전에 노후계량기가 교체된 상태를 고려하여 계량기 관리가 양호한 특광역시를 기준으로 하여 2018년의 평균 계량기 불감율 3.4%를 산정하여 총공급량 대비 수량을 산정하였다. 무효수량은 사용상 무효라고 인정되는 수량으로 누수량과 조정감액수량의 합으로 구해진다. 총급수량 중 계측 및 산정이 가능한 계량 요금수량과 계량기 불감수량을 제외한 항목은 누수량으로 가정하였다.

본 연구에서는 총누수량을 배경누수량과 파열누수량으로 분류하였으며, 이 중 배경누수량은 앞서 설명한 Lambert et al. (1999)에서 제시한 배수관과 급수관, 옥내 배경누수량에 대한 매개변수 값을 Table 3과 같이 활용하였다. 이에 대한 식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 &BackgroundLeakage (m^3/d) \\
 &= (0.02 \times A(m) + 1.25 \times B + 0.033 \times C(m)) \times ICF \\
 &\times \left(\frac{P_{ave.}}{50}\right)^{1.5} \times 24 / 1,000 \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서, A는 배수관 연장(m), B는 급수전수, C는 옥내관 연장(m)이며, ICF는 시설상태계수, $P_{ave.}$ 는 평균수압이다. 이 중 C는 계량기 전단 제수밸브에서 계량기까지의 관로연장으로써 국내의 관망 자료에서는

Table 2. Water supply status by small block of target area

Small block name	Pipe length (m)			Hydrant (ea)	Supply (m ³ /d)	Usage (m ³ /d)	Revenue water ratio (%)	Elevation deviation (EL.m)
	Sum	Distribution	Supply					
CC-1	20,342	11,953	8,388	550	569.5	477.7	65.8%	41.0
HS-2	64,648	48,229	16,419	1,138	608.6	515.1	80.5%	21.2
JY-1-2	20,321	15,158	5,164	434	194.3	160.3	75.7%	29.0
JY-2-2	3,495	2,703	792.2	68	23.3	21.6	91.0%	12.5
JY-2-3	10,993	9,042	1,951	159	140.9	81.3	76.1%	26.8
YC-2-2	12,021	10,172	1,848	151	138.6	79.9	89.9%	23.7
YC-2-3	19,276	13,869	5,407	156	196.7	122.6	80.9%	23.7
YC-2-4	9,442	6,592	2,851	165	83.0	60.3	92.6%	20.8
SG-1-2	18,795	15,024	3,771	383	227.3	203.0	84.2%	33.5
OD-1	89,503	77,801	11,703	1,188	590.6	459.9	71.3%	32.2
OD-2	35,989	29,809	6,180	639	306.7	236.5	61.3%	24.1
sum	304,826	240,352	64,474	5,031	3,079.3	2418.2	74.7%	288.5



Table 3. Parameter and value for Background leakage calculation

Parameter	value	unit
Background leakage on mains (A)	20	L/km/h
Background leakage on service connection to curb stop (B)	1.25	L/conn/h
Background leakage on service connection from curb stop to meter (C)	0.033 (0.5)	L/km/h (L/conn/h)
ICF (Infrastructure condition factor)	1~4	-

이를 분리하여 관리하고 있지 않아 적용하기 위해 일반적으로 급수분기점에서 계량기 전단 제수밸브까지의 평균길이인 2 m를 고려하여 총 급수관연장(S)(m)에서 2 m를 뺀 값을 환산하여 식 (4)와 같이 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{BackgroundLeakage (m}^3\text{/d)} \\
 & = (0.02 \times A(m) + 1.25 \times B + (S(m) - 2) \times 0.033 \times C(m)) \\
 & \times \text{ICF} \times \left(\frac{P_{\text{ave}}}{50}\right)^{1.5} \times 24 / 1,000 \quad (4)
 \end{aligned}$$

파열누수량은 총누수량에서 배경누수량을 제한 값으로 하였으며, 관로별 파열누수량 산정을 위해 총 파열누수량에 배수관 30%, 급수관 50%, 급수전 20% 배율을 적용하여 산정했다.

(2) 관로별 누수성분 재분배

기존의 산정식을 통해 산정된 관로별 누수성분에 실제 대상지역 관로의 누수량을 반영함으로써 정확도를 향상하였다. 대상지역 관로의 실제 누수량은 단계시험을 실시하여 산정하고, 총누수량에 대한 단계별 누수량 비율을 재산정 및 재분배를 통해 관로별 누수량을 보정하였다. 보정과정은 각 관로별 배경·파열 누수량을 해당 단계의 누수량 총합으로 나눈 뒤, 재배분한 누수량을 곱하여 산정하였다.

3.2.3 유수율 제고전략 적용

달성가능한 유수율 산정을 위한 유수율 제고 방법은 직접적인 누수저감 효과 측정을 위해 1) 관망정비, 2) 누수탐사 및 복구, 3) 노후계량기 교체, 4) 수압제어로 한정하였다. 이 중에서 파열누수량은 관망정비, 누수탐사 및 복구, 수압제어를 통해 저감이 가능하며, 배경누수량은 수압제어와 관망정비를 통해 저감이 가능한 것으로 가정하였다. 또한, 노후계량기 교체를 통해서 계량기불감수량 저감이 가능하다.

(1) 관망정비, 누수탐사 및 계량기 교체에 따른 누수저감량 산정

누수저감량 산정 시 개량 전·후에 대한 물사용량은 분석대상기간에 산정한 값과 동일한 값을 사용하였다. 본 연구의 대상지역은 대상기간을 종점으로 노후 계량기 교체가 완료된 상태로 계량기 불감수량은 이미 개선된 것으로 하여 계량기 불감수량은 검침량의 3.4%로 동일한 것으로 가정하였다.

단계시험, 현장조사 및 사업비 등을 고려하여 선정한 관망정비 대상관로는 배경누수량 저감이 가능하며, 관망정비시 관상상태 수준이 좋아져 ICF가 4에서 1이 되는 것으로 가정하여 배경누수량을 재산정하였고, 그 외의 관망정비 비대상관로는 기존의 배경누수량과 동일한 값을 적용하였다.

파열누수량은 누수탐사 및 복구로 개량 이후 50% 개선이 가능한 것으로 가정하였고, 세 가지의 조건을 모두 충족시 적용했다. 1) 관망정비 대상관로가 아니고, 2) 단계시험에 의해 단계별 누수량총합이 0.5 m³/h 보다 크며, 3) 단계별 관로의 단위길이당 누수량이 0.25 m³/h/km 이상인 관로에 한하여 적용한다. 이는 대상 지역의 수도사업자 및 현장담당자의 경험을 참고하여 가정하였다.

(2) 수압제어를 통한 누수저감량 산정

수압제어 적용 시에는 상수도시설 기준으로 최소동수압인 150 kPa 이상을 만족하는 감압밸브 위치를 선정하고, 설정 합을 활용하였다. 블록의 주요지점에 설치된 유량계와 수압계를 이용하여 야간최소유량을 분석하고, 이를 통해 도출된 누수량과 수압과의 관계식 (FAVAD 공식)을 분석하여 누수지수(Emitter exponent, N1)을 산정했다. 여기서 FAVAD 공식은 식 (5)와 같으며, L_b와 L_a는 각각 수압변동 전·후의 누수량(m³/d), P_b와 P_a는 각각 수압변동 전·후의 수압이다.

$$\frac{L_a}{L_b} = \frac{P_a}{P_b} \times N1 \quad (5)$$

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

실측된 블록의 평균 수압과 각 관로별로 산정된 총 누수량(Leakage, m³/d), N1을 이용하여 각 관로별 누수 계수(Emitter Coeff.)를 식 (6)과 같이 산정하였다. 그리고 EPANET을 이용하여 수리해석을 하여 총공급량이 일치하도록 블록 평균수압을 조정하여 수리해석 모델을 구축했다.

$$Emitter\ Coeff. = \frac{Leakage\ (m^3/d)}{(P_{ave.})^{N1}} \quad (6)$$

관망정비 및 누수탐사를 통한 누수저감활동을 적용한 후 관망모델 기준으로 구축된 수리해석 모델을 이용하여 감압밸브 설치 전과 후에 대한 총 누수저감량을 산정하고, 저감된 총 누수량은 사업비 내의 관망정비 사업물량 분석시 차감하여 유수율을 산정했다. 이는 총 누수량에 비해 수압제어로 인해 저감되는 누수량이 미량이며, 이후 관망정비 사업물량 분석시 큰 영향이 없을 것으로 판단되기 때문이다.

3.2.4 달성가능한 유수율 및 사업물량 산정

관망정비 사업비 범위내에서 각 관로별 누수성분에 따른 누수저감방법의 적용을 통해 저감된 누수량을 산정하고, 총괄수지분석을 통해 유수율을 산정하였다. 산정된 유수율이 대상지역의 목표유수율을 달성하지 못할 경우 각 블록별 기준으로 추가 관망정비 사업물량을 산정했다. 단계시험에서 산정된 총 배·급수 관로 연장당 단계별 누수량을 내림차순으로 나열하여 필요한 관망정비물량을 산정하고, 이에 대한 유수율과 관망정비물량의 관계식을 통해 목표유수율 달성을 위한 추가 관망정비 물량을 산정했다. 추가물량 산정 시에는 관망정비 이외의 다른 유수율 제고방안은 고려하지 않았으며, 이에 따라 누수탐사에 의한 파열누수량 저감 효과를 제외하였다.

3.2.5 누수성분분석 결과 검증

누수성분분석에 관한 분석결과 검증을 위해 관망정비를 실시한 대상지역에 대하여 관망정비 완료 시점의 소블록별 총괄수지분석을 통해 실제로 달성한 유수율을 분석했다. 그리고 실제 관망정비 실적과 공급된 관망정비 물량, 수도 검침량, 유수율 달성값을 적용하여 당초 분석시 사용한 매개변수 수치를 동일하

게 재적용하였다. 해당과정에서 유수율 산정 시 유량계 불량이 확인된 대상 블록 4지점은 분석대상에서 제외하였고, 수압관리에 의한 배경누수량 저감량은 검증 전 결과에 대한 수치를 일괄 적용한다. 이를 통해 기존의 분석결과 및 매개변수를 비교하여 검증하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 대상지역 누수성분분석

4.1.1 개량전 누수성분

대상지역의 11개의 소블록에 대한 총괄수량수지분석 및 누수성분분석에 대한 결과는 Fig. 2와 같다. 공급량은 OD-1 블록이 647.6 m³/일로 대상 지역의 11개의 소블록 중 가장 큰 공급량을 나타낸 반면, JY-2-2 블록이 20.3 m³/일로 가장 낮은 공급량을 나타내어 지역 내 블록간의 큰 편차를 보였다. 공급량에 대한 총괄수량수지분석을 통해 산출된 유수율은 61.3~92.6%로 높은 편차를 보였으며, 총유수율은 74.7%로 산정됐다.

총누수량에 대한 배경누수량 산정식을 통해 누수량 성분을 분석 과정에서 시설의 상태를 고려하여 ICF 계수를 Fig. 3과 같이 적용하였는데, 이 중 유수율이 90% 이상을 나타내는 JY-2-2와 YC-2-4 블록은 각각 0.33과 0.38을 적용하였다. IWA에서 일반적으로 ICF 적용 시 1~4를 적용할 것을 제시하고 있으나, 대상 블록의 누수량이 매우 적어 ICF를 조정하였고, 개량 후의 누수량 성분분석 시에도 조정된 수치를 적용하였다. 특히, JY-2-2는 규모가 매우 작고, 유수율이 높아 보정을 위한 단계시험을 시행하지 않고, 기존에 배분한 관로별 누수량을 그대로 활용하였다.

또한, 야간유량분석을 통해 산정된 평균 수압은 최소 25.8 m (HS-2), 최대 49.9 m (SG-1-2)로 산정되었다. 이 중 표고편차가 41 m로 가장 크게 차이가 났던 CC-1의 경우 최소수압과 최대수압의 편차가 19.6 m로 가장 크게 나타났다.

특히, Fig. 4와 같이 유수율이 30% 이상인 CC-1과 OD-2 블록은 총누수량 대비 파열누수량의 비율이 50% 이상으로 나타났으며, 이로 인해 70% 이하의 낮은 유수율을 보였다. 이 외에는 전반적으로 배경누수

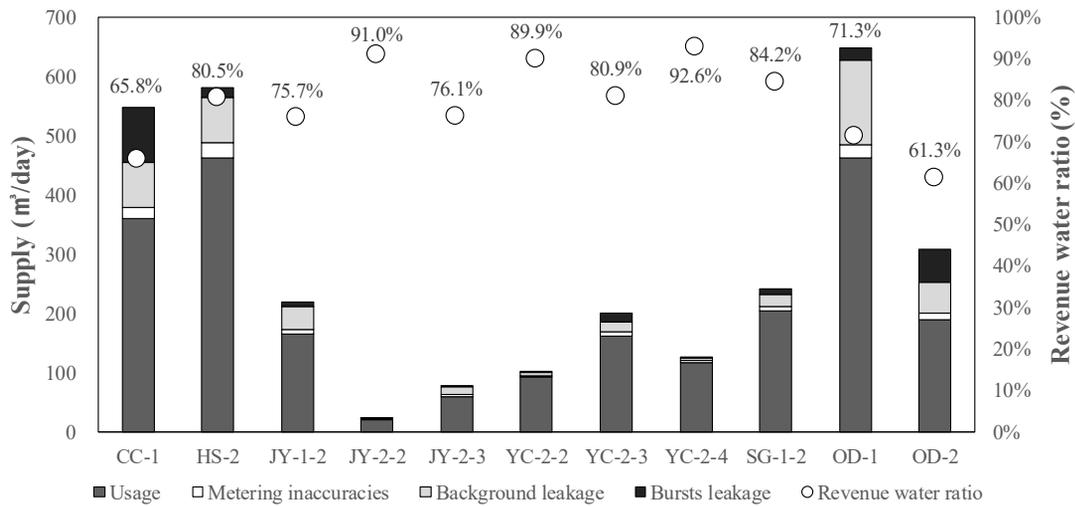


Fig. 2. Total revenue water account balance analysis and RWR before leakage reduction activities.

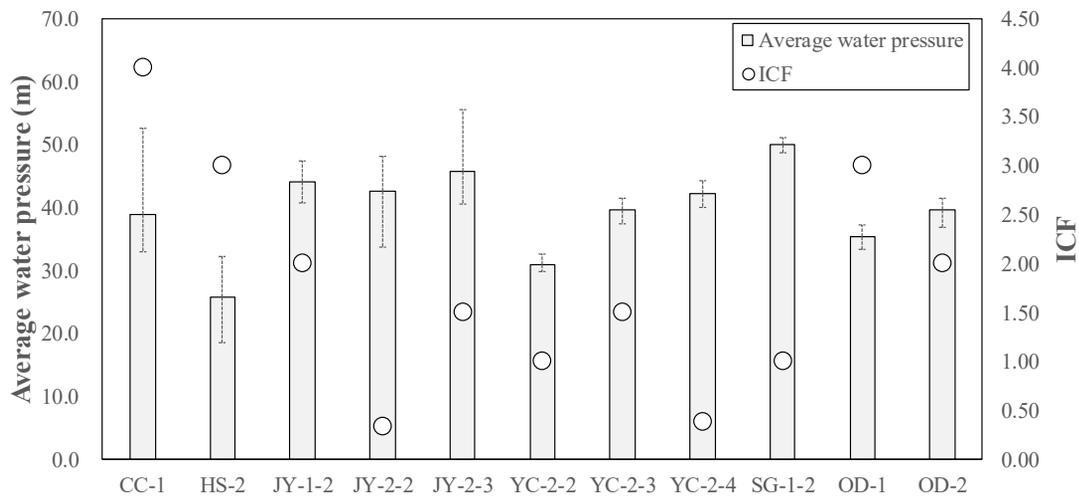


Fig. 3. Average water pressure and ICF before leakage reduction activities.

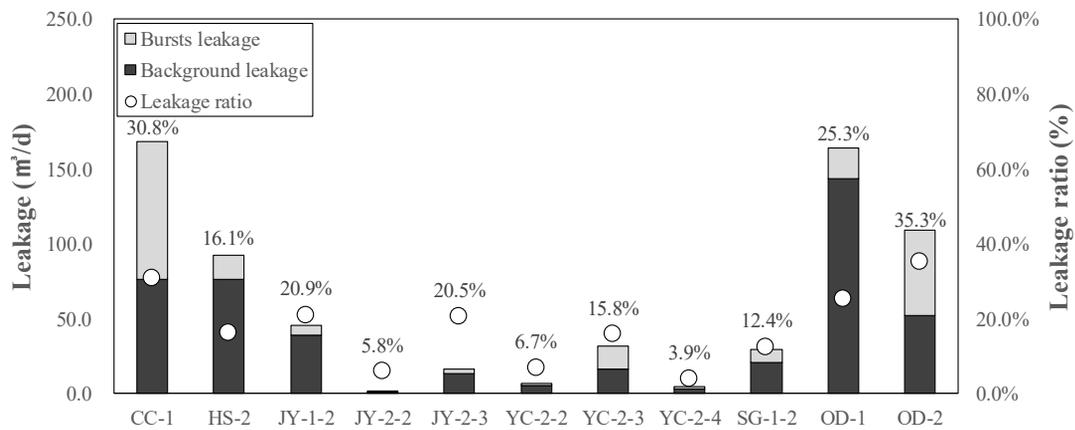


Fig. 4. Leakage and leakage ratio before leakage reduction activities.

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

량이 80% 이상을 차지하였고, 이 중에서 공급량이 가장 큰 OD-1에서 총누수량 대비 배경누수량이 87.9%로 최고치를 보였으며, 앞서 설명한 누수율 30% 이상의 지점을 제외하고 가장 높은 누수율을 나타냈다.

4.1.2 개량후 누수성분

(1) 관망정비 및 누수탐사를 통한 누수저감량 산정 대상지역의 사업비 내에서 소블록별로 관망정비 및 누수탐사에 따른 누수저감 시행 시 누수성분분석 결과는 Fig. 5와 같다. 유수율 제고를 통해 YC-2-2와 YC-2-4, SG-1-2블록의 유수율이 목표유수율 85%를 충족하였으나, 해당 블록은 기존에 다른 지점 대비 유수율이 84% 이상으로 거의 만족된 상태였으며, 실제 유

수율 증가율은 Fig. 6과 같이 5% 미만으로 소폭증가를 통해 달성 가능했다. 그 외의 목표유수율을 달성하지 못한 블록은 기존에 80% 이상의 유수율을 나타낸 HS-2와 YC-2-3을 제외하고, 7.9~18%의 비교적 높은 유수율 증가율을 보였다. 이는 유수율 80%를 기준으로 누수저감활동에 따른 유수율 증가율의 차이가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 총 유수율이 74.7%에서 81.0%로 증가하였으나, 대상지역의 목표유수율 85%에 미치지 못하는 수치로 나타났다. 따라서 추가 관망정비 사업물량 산출이 필요한 것으로 분석되었다.

누수저감 이후의 총 누수율은 개량 전 21.9% 대비 15.3%로 감소하였다. 개량 전과 후의 누수저감률은 Fig. 7과 같이 나타났다. 이 중 대상 지역 중 JY-2-2블

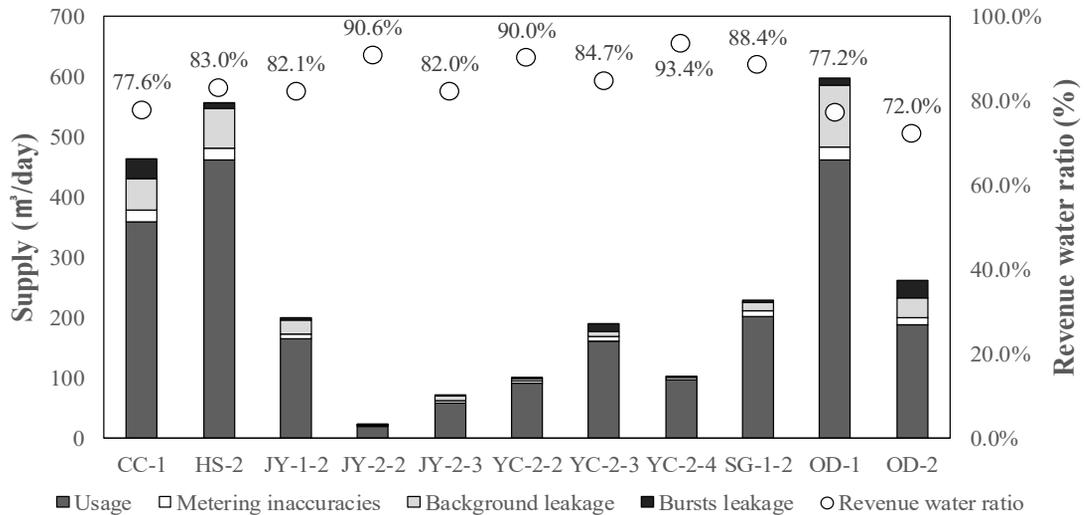


Fig. 5. Total revenue water account balance analysis and RWR after leakage reduction activities.

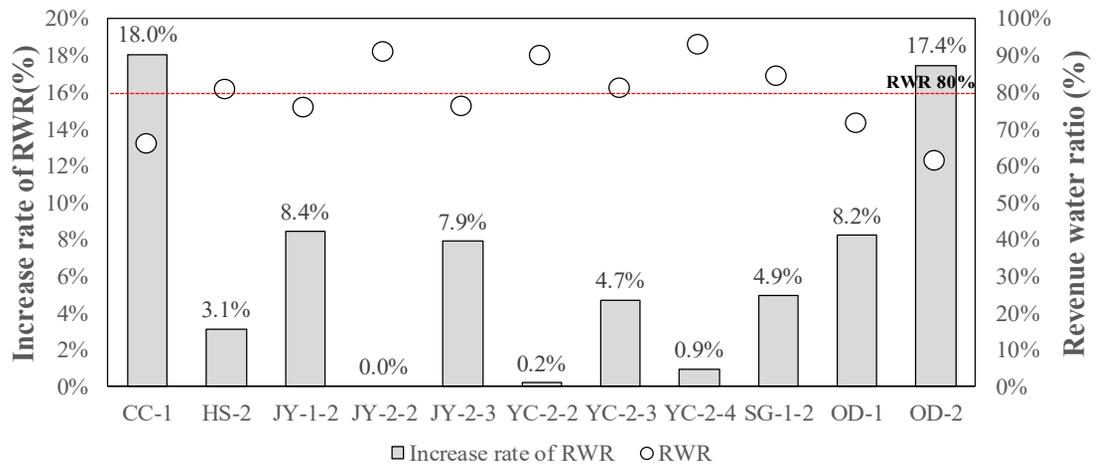


Fig. 6. Increase rate of RWR and RWR after leakage reduction activities by pipeline management and leakage control.

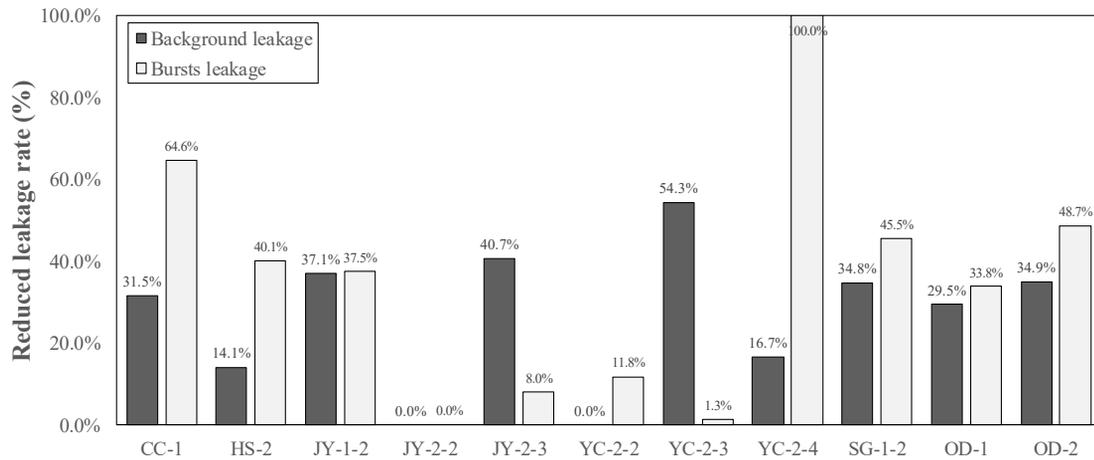


Fig. 7. Reduced leakage rate after leakage reduction activities by pipeline management and leakage control.

록은 앞서 설명한 바와 같이 기존에 규모가 작고 유수율이 높아 누수저감을 시행하지 않아 기존과 동일한 수치를 적용했다. 총배경누수량 저감률은 29.5%, 총파열누수량 저감률은 49.3%로 전반적으로 파열누수량 저감률이 약 1.5배 높게 나왔다. Hwang et al. (2021)에 따르면 유수율 증가량은 누수탐사에 크게 의존하며, 누수관리 측면에서 가장 효율적인 것으로 판단하였으며, 본 연구에서 누수탐사 및 복구를 통해 파열누수량 저감이 가능한 것으로 가정하여 높은 누수저감률을 나타낸 것으로 판단된다. 그러나 JY-2-3과 YC-2-3 블록은 배경누수저감률이 각각 40.7%, 54.3%로 높게 나왔는데, 누수탐사 및 복구 대상이 없어 파열누수량 저감이 비교적 적었고, 기존의 배경누수량이 적어 감압에 의한 저감효과가 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한, YC-2-4블록은 누수탐사를 시행하지 않으나, 기존의 파열누수량이 2 m³/일로 매우 적고, 배경누수저감의 대상이 되는 관망정비대상 관로 비율이 87.2%로 매우 높으며, 비대상 관로의 파열누수량은 총 0.02 m³/일로 산출되어 파열누수저감률이 100%로 나타났다.

(2) 수압제어를 통한 누수저감량 산정

수압제어에 의해 산정된 누수저감량은 총누수량 중 배경누수 저감량으로 가정하였고, 각 소블록별로 도출된 누수지수(N1)와 평균수압, 누수저감량은 Table 4와 같다. 이 중 CC-1은 기존에 4개의 감압밸브 중 신규 감압밸브 설치는 불필요한 것으로 나타났으며, 개량 후 관망의 수압제어에 따른 유수율 변동이 없었다.

JY-2-2은 추가적인 감압이 가능할 것으로 판단되었으나, 사용량 및 수용가가 적어 수압제어 대상지역에서 제외하였다. YC-2-2는 출수불량으로 인해 1개의 가압장 추가설치가 필요한 블록이나, 해당 구역의 물사용량과 누수량이 매우 낮아 추가 가압에 의한 유의미한 누수증가량이 없는 것으로 분석되었다. 또한, YC-2-3블록은 기존 가압밸브 재조정을 통한 감압관리가 필요한 것으로 나타났는데, 감압량 조절시 YC-2-4블록의 연계블록 임계점 고려가 필요하여 기존에 설치된 밸브의 재조정이 필요한 블록으로 분석됐다.

수압제어가 불필요한 3지점을 제외한 8지점에 수압제어를 위해 총 8개의 추가 감압밸브 설치와 2개의 기존감압밸브의 재설정이 필요한 것으로 분석되었다. 수압제어를 통한 배경누수의 저감량은 총 49.97 m³/일로 분석되었고, 이 중 3개의 감압밸브설치가 필요한 OD-1블록의 누수저감량은 12.22 m³/일로 가장 높은 값을 나타냈다.

4.2 사업비 내 관망정비물량

대상지역의 기존 유수율 74.7%에서 사업비 범위내에서 달성가능한 유수율은 81.0%로 이에 대한 관망정비 물량 및 비율은 Fig. 8과 같다. 총 배·급수관로 연장 304,826 m에 대한 관망정비가 필요한 물량은 49,929 m (16.4%)로 나타났다. 이 중에서 총배수관로 240,352 m, 총급수관로 64,474 m 중 배수연장 35,478 m (14.8%), 급수연장 64,474 m (22.4%)의 관망정비가 필요한 것으로 산정되었다. 특히, YC-2-4블록은 관망정

Table 4. Emitter exponent (N1), average water pressure and reduced leakage after leakage reduction activities by control water pressure

Small Block	Emitter Exponent (N1)	Calibrated Average Pressure (m)	Pressure at the Inlet Point (m)	Leakage Reduction (m ³ /day)	Additional Installation of Pressure reducing valve (ea)
CC-1	-	-	-	-	-
HS-2	1.1	30.5	19	1.61	1
JY-1-2	1.4	40.0	33	7.21	1
JY-2-2	-	-	-	-	-
JY-2-3	0.8	32.0	20	5.04	1
YC-2-2	0.7	21.0	-	-	-
YC-2-3	0.9	39.0	33	8.75	(1)
YC-2-4	0.6	42.0	40	0.45	(1)
SG-1-2	1.4	49.9	39	7.35	1
OD-1	1.1	42.0	19	12.22	3
			27		
			33		
OD-2	0.9	39.5	43	7.34	1

※ (): Number of resetting points of the previously installed pressure reducing valve

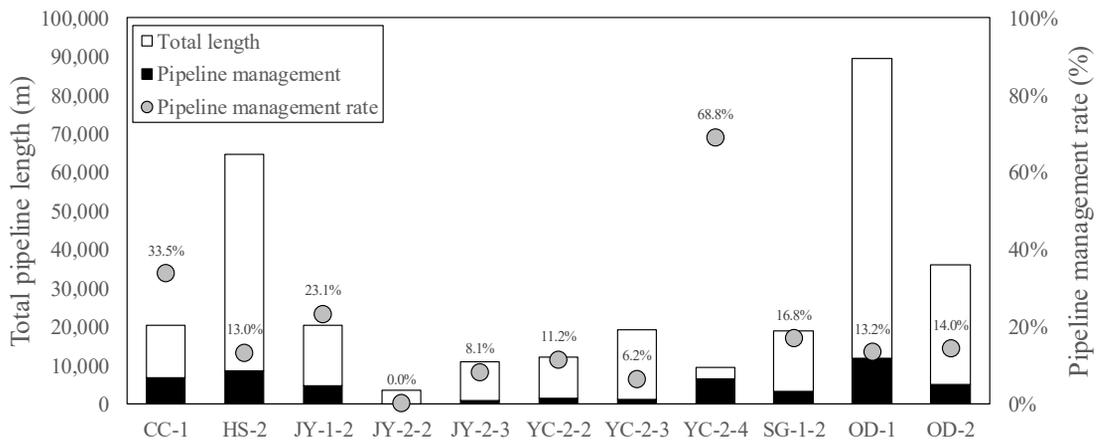


Fig. 8. Pipeline maintenance length and rate within the project cost.

비 대상 비율이 다른 블록(0~30.7%) 대비 87.2%의 관로에 대한 관망정비가 필요한 것으로 판단되어, 총관로연장 중 68.8%의 관망정비(배수관로 58.8%, 급수관로 91.9%)가 필요한 것으로 산출됐다.

4.3 목표유수율 달성을 위한 추가 관망정비 사업물량

대상지역의 사업비 내에서 산출된 달성가능한 유수율 81.0%에서 목표유수율 85.0%를 달성하기 위해 산정한 추가 관망정비 사업물량 및 비율은 Fig. 9와 같다. 기존 블록 중 이미 85%를 달성했던 JY-2-2, YC-2-2,

YC-2-4, SG-1-2를 제외한 총 7개 블록에 추가로 필요한 관망정비 사업물량은 총 67,625 m (22.2%)로 산정됐다. 특히 다른 블록 대비 개량 후의 유수율이 80% 미만이고, 관로길이가 30 km 이상인 OD-1과 OD-2 블록은 각각 30.9%, 58.7%의 추가 관망정비물량이 필요할 것으로 판단된다.

4.4 분석방법 및 결과에 대한 검증

앞선 분석결과(A)에 대한 검증을 위해 대상지역의 실제 관망정비 기간인 2021년 10월부터 2022년 3월의

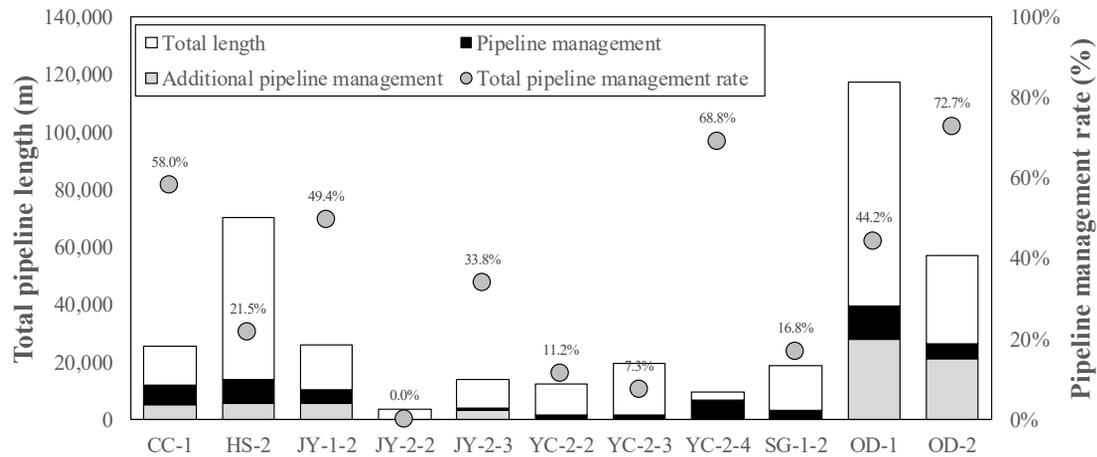


Fig. 9. Length and rate of additional pipeline maintenance to achieve target RWR.

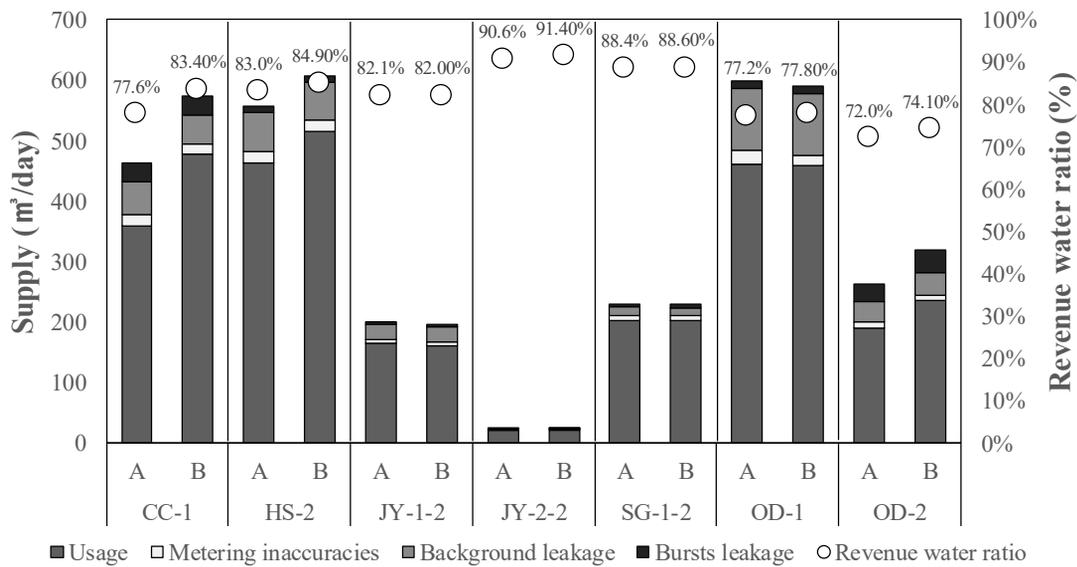


Fig. 10. Total revenue water account balance analysis and RWR (A: 2020.01.~2020.06.; B: 2021.10.~2022.03.).

실제 관망정비 실적, 물공급량, 검침량, 유수율 달성값을 본 방법론에 재적용하여 Fig. 10과 같이 비교 및 검증하였다. 대상지역의 총 11개의 소블록 중 유량계 불량 발생 4개를 제외한 7개의 소블록의 유수율 분석 결과(B), 총 달성 가능한 유수율은 81.7%로 나타났다. 이는 기존 분석을 통해 도출된 총유수율 81.0%와 실제로 검증 대상기간 중에 관망정비 및 누수탐사 활동을 통해 달성한 82.3%와 비교하여 유사한 수치로 산정됐다.

또한, 대상 지역의 소블록별 2020년의 기존분석결과(A)와 검증을 위한 본 분석결과(B)의 총괄수량수지 분석, 누수성분분석, 유수율에 관한 T-검정을 실시한

결과는 Fig. 11과 같으며, 전체적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($p>0.05$). 이를 통해 본 방법론 및 매개변수의 적절성을 검증하였으며, 추후 대상 지역과 유사한 조건의 지역에서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 총괄수량수지분석과 Lambert et al. (1994)가 제시한 BABE 접근법을 통해 관별로 누수성분분석을 하고, IWA에서 제시한 4가지 유수율 제고전략을 사업비 내에서 적용할 경우의 정비가능한 관망

물량과 이에 따른 달성가능 유수율을 제시하고, 목표 유수율 달성을 위한 추가관망정비물량을 산정하였다. 그리고 실제 관망정비를 실시한 기간의 자료에 방법론을 적용함으로써 검증하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 대상지역의 11개의 소블록에 대한 총괄수량수지 분석 및 누수성분분석 결과, 총 유수율은 74.7%로 산정됐다. 이 중 누수율이 30% 이상인 블록은 파열누수량이 누수의 주원인으로 나타났으며, 그 외에는 배경누수량이 주원인으로 산정되었다.
- 2) 유수율 제고전략을 적용한 개량 후 누수성분분석결과, 사업비 내에서 누수저감활동을 통해 달성가능한 총유수율은 81.0%로 산정됐다. 기존에 유수율이 84.0% 이상인 블록은 소폭증가를 통해 대상지점의 목표유수율 85.0%를 만족하였다. 또한, 기존 유수율 80.0%를 기준으로 누수저감활동에 따른 누수저감률의 차이가 크게 나타났다. 전반적으로 파열누수량 저감률이 약 1.5배 높게 나왔으며, 이는 누수탐사 및 복구 적용 여부에 따라 결정되었다.
- 3) 사업비 내에서 총유수율 74.7%에서 81.0%로 증가하기 위한 관망정비 물량은 총관로연장대비 16.4%의 관망정비 물량이 필요한 것으로 산정되었으며, 목표유수율을 85.0%를 달성하기 위해 추가로 22.2%의 관망정비물량이 필요하여 대상 지역은 총 38.6%의 관망정비가 필요한 것으로 산정됐다.
- 4) 본 방법론의 검증 결과, 기존 기간의 분석결과와 실제 관망정비를 실시한 기간의 분석결과가 통계적으로 유의한 차이가 없었으며($p>0.05$), 실제 달성 유수율 또한 유의한 차이가 없었다($p>0.05$). 이를 통해 본 연구의 방법론 및 매개변수를 대상 지역과 유사한 특성의 타지역에 적용하여 사업비 내에서 달성 가능한 적정 유수율과 사업물량을 산정하고, 목표 유수율 달성을 위한 유수율 제고전략 산정이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 사업물량을 통해 사업

비를 산출하고, 유수율 제고전략에 따른 누수저감율을 산정하여 향후 비용/편익 분석의 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 대상 지역과 다른 특성의 타지역에 적용 시 동일한 매개변수의 적용이 적절하지 않은 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해 다양한 지역에 적용함으로써 지역의 특성에 따른 적정 매개변수의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Hwang, J.S., Choi, T.H., Kim, K.B. and Koo, J.Y., 2021, Efficiency evaluation of water leakage management methods in local small and medium cities, Korean Soc. Water Wastewater, 35(2), 121-133.
- IWA. (2012). Performance indicators for water supply services. Second Edition, IWA Publishing.
- ME, 2021, Statistics of waterworks, 11-1480000-000181-10, 22.
- Kim, S.H. and Choi, H.Y. (2018). Review of revenue water ratio (%) as a performance indicator for waterworks facility management, Water Polic. Econ., 30, 27-39.
- KRIHS. (2016). On the direction of policy toward the efficiency of local water supply.
- K-water. (2009). Guide book of NRW reducing and management in water distribution system.
- K-water. (2011). A basic study for establishment of setting objective for leakage management of water pipe network.
- K-water. (2019). Development of water loss performance indicator based on cost-benefit.
- KWWA, ME and Kwater. (2015). Research for development of performance measurement indicators for local waterworks operation and management.
- 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 Suppl. : Res. Technol.-Aqua, 48(6), 227-237.
- Lambert, A.O. (1994). Accounting for losses: The bursts and background concept, J. Inst. Water Environ. Manag., 8(2), 205-214.