



경제성을 고려한 지방상수도 목표 우수율 산정

Calculation of the target revenue water ratio of local waterworks considering economic feasibility

김동홍^{1,2} · 이재범³ · 송정관⁴ · 최태호^{5*}

Donghong Kim^{1,2} · Jaebum Lee³ · Jungkwan Song⁴ · Taeho Choi^{5*}

¹한국수자원공사 지방상수도처, ²한남대학교 토목환경공학과, ³한국수자원공사 전남지역협력단

⁴한국수자원공사 전남중부권지사, ⁵한국수자원공사 상하수도연구소

¹*Korea Water Resources Corporation, Local Water Supply Dept.*

²*Hannam University, Department of Civil & Environmental Engineering*

³*Korea Water Resources Corporation, Jeonnam Regional Collaboration Office*

⁴*Korea Water Resources Corporation, Central Jeonnam Office*

⁵*Korea Water Resources Corporation, Water & Wastewater Research Center*

ABSTRACT

As an advanced study on the method of calculating the target revenue water ratio of local waterworks through the leakage component analysis method proposed by Kim et al. (2022), this study developed a model to calculate the achievable revenue water ratio within the specified project cost, the required project cost to achieve the specified target revenue water ratio, and the economically appropriate target revenue water ratio level by considering the leakage reduction cost and leakage reduction benefit for each revenue water ratio improvement strategy, and conducted an applicability evaluation of the developed model using actual field data. The procedure for calculating the target revenue water ratio of local waterworks considering economics proposed in this study consists of three stages: physical data linkage model construction, leakage component analysis, and economic analysis, and the applicability was evaluated for Zone H with

Received 8 September 2023, revised 30 October 2023, accepted 3 November 2023.

*Corresponding author: Taeho Choi (E-mail: choistarth@kwater.or.kr; Fax: 82-42-870-7549; Tel: 82-42-870-7512)

1,2 김동홍 (부장) / Donghong Kim (General Manager)

대전광역시 대덕구 신탄진로 200, 34350
200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34350, Republic of Korea
대전광역시 대덕구 한남로 70, 34430
70, Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Republic of Korea

3 이재범 (차장) / Jaebum Lee (Senior Manager)

광주광역시 서구 상무중앙로 72번길 3, 61949
3, Sangmujungang-ro 72beon-gil, Seo-gu, Gwangju 61949, Republic of Korea

4 송정관 (부장) / Jungkwan Song (General Manager)

전라남도 화순군 화순읍 화동로 126, 58129
126, Hwadong-ro Hwasun-eup, Hwasun-gun, Jeollanam-do 58129, Republic of Korea

5 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.

branch type and the Zone M network type. As a result of the application, it was calculated that approximately 32.5 billion won would be required to achieve the target revenue water ratio of 70% in the Zone H, and approximately KRW 10.5 billion would be required to achieve the target revenue water ratio of 75% in the Zone M. If the business scale of Zones H and M was corrected to 10,000 m³/day of water usage, the required project cost for a 1% improvement in the revenue water ratio of Zone H was calculated to be 0.7642 billion won and 0.4715 billion won for Zone M.

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

지방상수도 유수율 제고 사업은 유수율 제고 사업화 단계와 관망운영관리 단계로 크게 구분 할 수 있다. 유수율 제고 사업화 단계는 운영초기, 관망도 전산화, 블록시스템 구축, 관망정비 등을 수행하여 낮은 유수율 수준을 단기적으로 일정 수준의 목표 유수율 달성을 목적으로 하고, 관망운영관리 단계는 목표 유수율 유지를 목적으로 한다.

우리나라의 유수율 제고사업화 단계는 태백권 상수도관망 최적관리시스템 구축 사업(2010~2015년), 지방상수도 현대화사업(2017~2024년) 등과 같은 국책 사업이 대표적이며, 관망운영관리 단계는 K-water의 지자체 위수탁 방식인 운영효율화사업(2004~현재)이 대표적이다. 그리고, 지방상수도 현대화사업은 2단계 현대화사업(유수율 제고사업화 단계) 및 Post 현대화사업(관망운영관리 단계)을 지속적으로 추진중에 있다.

하지만, 지방상수도 현대화사업 등과 같은 유수율 제고사업화 단계의 국책사업의 경우 사업목표 유수율을 지역특성을 고려하지 않고 일괄적으로 85%로 설정하고 있어 특정 지역의 성과목표 미달성 우려로 합리적인 목표 유수율에 대한 요구가 증가하고 있다. 또한, 사업 목표 유수율을 일괄적으로 적용하더라도 투입되는 사업비를 지역 여건을 고려하여 책정할 수도 있으나, 이를 위한 적용 근거 및 산정방법이 정해져 있지 않아, 사업설계 및 추진에 어려움이 있는 것도 마찬가지이다.

이러한 문제를 해소하기 위해 수많은 관련 연구들이 수행된 바 있으며, 특히, Choi and Cho (2014), Ko et al. (2015), Kim et al. (2015) 등의 연구에서는 상수도사업 경영 효율성 평가를 주제로 적용을 시도하였고, Choi et al. (2015), Kim et al. (2015), Hwang et al.

(2021)은 자료포락분석 방법을 이용하여 누수관리비용 대비 효과에 대한 통계적 방법의 누수관리 모델을 제시한 바 있었다. 하지만 이들 연구수행 결과들을 다양한 지역특성이 고려된 모델을 활용하기 위해서는 수 많은 누수관리 실적데이터와 지역특성 자료가 충분히 관리되고 있어야 되는 한계점이 있어 활용성이 떨어지는 것으로 평가되었다.

하지만, 기존 연구의 통계적 모델을 활용하는 방법과 달리, Kim et al.(2022)의 연구에서는 누수량 성분분석 방법을 적용하여 기존 연구에 대한 한계점을 극복한 바 있으며, 이러한 누수량 성분분석 방법은 유수율 제고 사업화 단계에 대한 목표 유수율 산정 및 유수율 제고 전략 산정 방법론을 제안하고, 이를 통해 지역 여건을 고려하여 사업 목표 유수율 달성 여부를 적절하게 판별할 수 있는 것으로 평가 되었다. 본 제안 방법의 경우에는 관로별 누수량을 세분화하여 할당하고, 유수율 제고 방법별로 누수성분별 누수저감량을 정량적으로 산정한 것에 대해서는 기존 방법에 비해 진보된 접근방법이었으나, 목표 유수율별로 사업비는 얼마가 필요한지, 또는 정해진 사업비로 달성 가능한 유수율이 얼마인지 등에 대한 분석하기에는 한계점이 있었다.

따라서 본 연구에서는 Kim et al.(2022)이 제안한 누수량 성분분석 방법을 통한 지방상수도 목표 유수율 산정방법에 대한 고도화 연구로써, 기존 누수량 성분분석 방법의 한계점을 보완하기 위하여 유수율 제고 전략별 누수저감 비용과 누수저감 편익을 추가적으로 고려하여 정해진 사업비내 달성가능한 유수율, 정해진 목표 유수율을 달성하기 위해 필요한 사업비 그리고 경제적으로 적정한 목표 유수율 수준 등을 산정하기 위한 모델을 개발하고, 이를 실제 현장 데이터를 활용하여 개발 모델에 대한 적용성 평가를 수행하였다. 그리고, 실제 현장 데이터는 수지상식과 망목식의 전형



적인 관망 형태로 지역특성이 구분된 대상지역에 적용하여 각각에 대한 경제적인 우수율 및 목표 우수율에 대한 산정결과를 분석하고 향후 다양한 지역특성 지역을 대상으로 확대 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 분석방법

2.1 분석절차

경제성을 고려한 지방상수도 목표 우수율 산정 절차는 크게 물리적 데이터 연계 모델 구축, 누수량성분 분석, 경제성분석의 3단계로 구분된다(Fig. 1).

2.1.1 물리적 데이터 연계 모델 구축

물리적 데이터 연계모델은 수용가 정보, 관로정보,

구역정보, 검침 및 계측자료, GIS 및 노후도평가자료 등을 수집한 후 모든 관망에서의 물리적 요소를 수도계량기, 급수관로, 배수관로, 단계, 블록의 순으로 연계시켜, 배수관로를 중심으로 모든 배수관로에 연결된 해당 수용가의 검침량 데이터가 취합이 될 수 있도록 물리적 데이터 연계 모델을 구축하였다. 구축된 모델에서의 배수관로는 해당 단계 및 블록과도 연계시켜 물공급량 및 누수량을 배분할 수 있도록 하였다.

2.1.2 누수량 성분분석

구축된 물리적 데이터 연계 모델에서 배수관로별 물사용량 및 누수량 성분을 배분하기 위하여 총괄수지분석, BABE(Background and burst estimate) 접근법 개념을 활용하였다. 즉, 모든 배수관로에 대하여 물사용량, 명목손실량, 배경누수량, 파열누수량을 배분하였

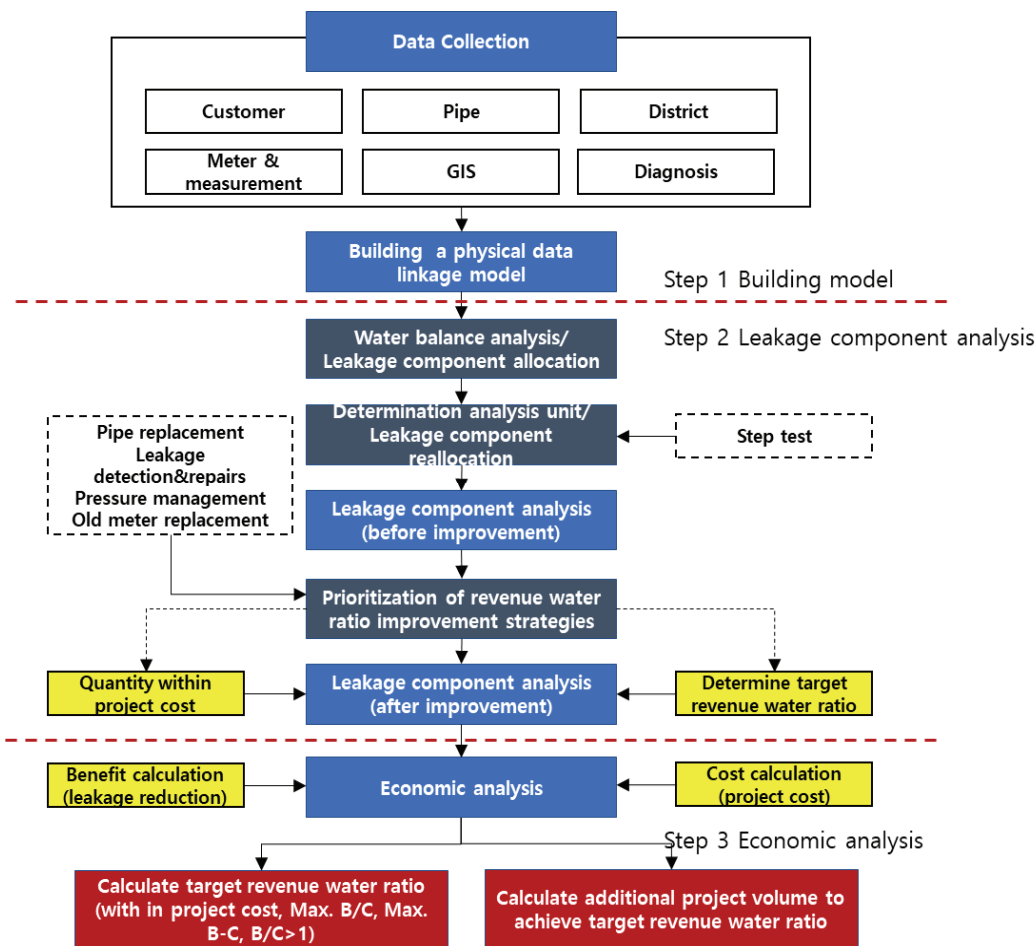


Fig. 1. The flow chart of this study.

다. 물사용량은 배수관로에 직접적으로 연계된 수용가의 물사용량 데이터를 사용하였고, 명목손실량은 수용가 계량기의 불감율을 적용하여 산정하였다. 그리고 배경누수량은 Lambert et al. (1999)에서 제시한 배수관과 급수관, 옥내 배경누수량에 대한 매개변수 값을 적용한 식(1)을 활용하였다.

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

여기서, A는 배수관 연장(m), B는 급수전수, C는 옥내관 연장(m)이며, ICF는 시설상태인자, P_{ave.}는 평균수압이다. 이 중 C는 계량기 전단 제수밸브에서 계량기까지의 관로연장으로 국내의 경우에는 이를 분리하여 관리하고 있지 않고 있다. 이를 적용하기 위해 일반적으로 급수분기점에서 계량기 전단 제수밸브까지의 평균연장 2 m를 고려하여 총 급수관연장(S)(m)에서 2 m를 뺀 값을 환산하여 식(2)와 같이 적용하여 활용하였다.

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

파열누수량은 총누수량에서 배경누수량을 제외한 값으로 하였으며, 관로별 파열누수량 산정을 위해 과거 누수이력 및 실무자 경험에 의해 총 파열누수량에 배수관 30%, 급수관 50%, 급수전 20% 배율을 적용하여 산정하였다.

이후 관로별 배분된 누수성분량의 정확도를 높이기 위하여 단계시험 결과를 활용하였다. 단계시험이란 유수율 제고사업의 일환으로 야간시간대에 소블록 유입유량계를 감시하면서 밸브조작을 통해 관말부터 소규모 구역별 야간누수량을 산정하는 방법이다. 이러한 단계시험을 하게 되면 소규모 구역별 즉, 단계별 누수량을 정확히 산정할 수 있어 향후 누수탐사 및 유수율 제고에 활용성이 높다. 그래서 기존에 산정된 개별 배수관로별 누수성분량을 단계시험결과로 산정된 단계별 누수량으로 환산하여 재분배하게 되면 보다 정확한 누수성분량이 산정될 수 있다. 이렇게 재분배된 배수관로별 누수성분량은 유수율 제고 전략을 적용 전인 개량전 누수성분분석에 해당되며, 유수율 제고 전략에 대한 매개변수를 적용한 개량후 누수성분분석을 통해 개별관로별 누수저감량, 유수율 등을 산정할 수 있다.

유수율 제고 전략은 관망정비(관로교체), 누수탐사 및 복구, 수압관리 및 계량기 교체로 제한하였으며, 유수율 제고전략별 저감가능한 누수성분과 매개변수는 Table 2와 같이 정의하였다.

유수율 제고 전략에 의한 개량후 누수성분은 먼저,

Table 1. Parameter and value for Background leakage calculation

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

Table 2. Leakage component and parameters that can be reduced by revenue water ratio improvement strategy

Division	Pipe replacement	Leakage detection & repairs	Pressure management	Old meter replacement
Leakage component	Background and bursts leakage	Bursts leakage	Background and bursts leakage	Apparent losses
Parameter	Infrastructure condition factor(ICF)	Leakage detection efficiency	Leakage index(N1)	Meter dead rate



관망정비의 경우에는 배경누수량 산정식에서 ICF를 4에서 1이 되도록 조정하고, 파열누수량은 0이 되도록 하였다. 그리고 누수탐사 및 복구의 경우에는 누수탐사효율에 파열누수량이 저감되도록 하였고, 수압관리의 경우에는 FAVAD(Fixed and Variable Area Discharge) 공식에 따라 N1 및 감압가능량에 따라서 배경 및 파열누수량에 대한 저감량을 산정하였다. 그리고 노후계량기 교체의 경우에는 계량기 불감율이 향상되도록 적용하여 명목손실량이 저감되도록 하였다.

그리고, 우수율 제고 전략은 실제 우수율 제고사업과 유사하게 산정하기 위하여 누수저감 효율이 높은 방법부터 우선적으로 적용하여 총 투입방법에 대한 누수저감량, 우수율 변화 등이 산정될 수 있도록 하였다.

2.1.3 경제성 분석 방법

누수량 성분분석 이후에는 우수율 제고 전략별 투입물량에 대한 비용과 이에 대한 누수저감 편익을 고려하여 우수율 제고 사업에 대한 경제성 분석을 시행하였다. 누수저감에 대한 비용과 편익은 직·간접적인 항목으로 구분할 수 있으나, 본 연구에서는 관망정비비용, 누수탐사 및 복구비용, 수압관리비용 등의 직접적인 누수저감비용과 우수율 제고활동에 따른 누수저감량에 대한 직접적인 누수저감 편익만을 고려하여 경제성 분석을 시행하였다.

관망정비비용과 수압관리비용의 경우에는 관경별 비용단가를 적용하였고, 누수탐사비용과 복구비용은 연구대상지역의 과거 누수탐사 및 복구이력을 활용하여 관로연장당 누수탐사비용, 관로연장당 누수복구비용을 각각 산정하여 적용하였다. 누수저감편익의 경우에는 누수저감량을 연구대상지역의 수돗물 원가에서 영업비용만을 고려하여 적용하였고, 비용과 편익에 대한 할인율은 고려하지 않았다.

실제 우수율 제고를 위한 단계시험시 활용되는 단계별로 효율이 가장 좋은 단계부터 우선적으로 관망정비, 누수탐사 및 복구, 수압관리 등의 우수율 제고 활동을 시행하도록 하였으며, 이에 대한 비용과 편익도 함께 산정하였다. 효율이 가장 좋은 우수율 제고 전략과 단계부터 순차적으로 적용하여 B/C 최대, B-C 최대, $B/C \geq 1$ 이기 위한 지점의 소요사업비 및 우수율을 각각 산정하고, 정해진 사업목표 우수율을 달성하기 위한 사업비, 정해진 사업비에 대한 달성가능한 우수율을 산정 할 수 있도록 하였다.

2.2 연구대상지역 현황

본 연구에서 제시한 경제성을 고려한 지방상수도 목표 우수율 산정방법은 도서지역인 J 연구대상지역을 대상으로 적용성 평가를 시행하였다. 본 연구에서 제안한 방법이 다양한 지역특성을 가지고 있는 지역으로의 확대 가능성을 검토하기 위하여 J 연구대상지역 중 지역특성이 명확히 구분되는 수지상식 관망 구역과 망목상식 관망 구역으로 구분하여 적용하였으며, 2개 구역에 대한 지역특성은 다음과 같다(Table 3).

H 구역은 수지상식 관망의 전형적인 형태를 띠고 있는 구역으로서 배수관로 연장당 급수관로 연장비율은 평균 0.74 m/m이고, 급수전당 배수관로 연장 비율은 30.3 m/전으로 나타난 지역이며, M 구역은 망목상식 관망의 전형적인 형태를 띠고 있는 구역으로서 배수관로 연장당 급수관로 연장비율은 평균 0.20 m/m이고, 급수전당 배수관로연장 비율은 19.2 m/전으로 나타난 지역이다.

M 구역의 경우 총 관로연장 대비 물사용량과 누수량이 수지상식 관망 형태를 가지고 있는 H 구역에 비해 많으며, 관망정비, 누수탐사 및 복구 등의 투입물량 대비 누수저감량 효과는 H 구역보다 클 것으로 예측되는 지역특성을 가지고 있다.

Table 3. Current status of regional characteristics of Zone H and M of study area J

Zone name	distribution pipe length(m)	supply pipe length(m)	number of connection (conn.)	supply/distribution (m/m)	distribution/connection (m/conn.)	total pipe length/connection (m/conn.)
Zone H	435,950	322,549	14,387	0.74	30.3	52.7
Zone M	59,152	12,045	3,078	0.20	19.2	23.1

3. 연구결과 및 고찰

경제성을 고려한 지방상수도 목표 유수율 산정방법에 대한 현장 적용성 평가 및 지역특성별 결과 비교 및 활용성 검토를 위하여 J 연구대상지역의 H 구역과 M 구역을 대상으로 적용 및 분석하였다. H 구역의 경우 수지상식 관망으로 17개의 소블록이 독립적으로 분리되어 있어 물리적 데이터 연계모델을 소블록별로 별도로 구축하였으며, M 구역의 경우에는 망목상식 관망으로 3개의 소블록이 밀접하게 연계되어 있어 물리적 데이터 연계모델을 1개로 통합하여 분석하였다. H 구역과 M 구역의 유수율 제고 사업목표 유수율은 각각 70%, 75%이며 분석결과는 다음과 같다.

3.1 H 구역 적용결과

H 구역은 17개의 소블록으로 구성되어 있으며, 유수율 제고 사업은 2017년부터 시작하였으며, 분석대상시점은 2022년 3월 기준으로 하고, 사업종료시점은 분석대상시점으로부터 5년간으로 하여 분석하였다.

분석대상시점에서 유수율 제고방법 중 관망정비, 누수탐사 및 복구, 수압관리로 한정하였고, 노후계량기 교체는 기 시행한 것으로 반영하였다.

3.1.1 누수량 성분분석 결과

H 구역의 사업이전인 2017년도의 유수율은 33.0%이며, 이때의 수용가정보, 관로정보, 검침 및 계측자료, GIS 등의 자료가 부족하여 분석대상시점인 2022년 3월 기준의 누수량 성분분석결과를 환산하여 Table 4와 같이 산정하였다.

그리고, 분석대상시점 기준에 대한 누수량 성분분석은 2021년 10월~2022년 3월에 대한 소블록별 공급량, 사용량 자료 및 GIS, 노후도 평가자료를 활용하여 산정하였고, 명목손실량은 분석대상시점에 노후 계량기 교체가 완료되어 전국 특광역시 평균 계량기 불감율인 3.3%를 기반영하여 산정하였다. 그리고, 대상지역에 대한 단계시험결과를 반영하여 관로별 누수량을 재배분하였으며, 이렇게 산정된 개량전 누수량 성분 분석결과는 Table 5와 같다.

Table 4. Status of revenue water ratio before project(2017) in Zone H

Zone name	Flow (m ³ /d)	Usage (m ³ /d)	Apparent losses (m ³ /d)	Background and bursts leakage(m ³ /d)	Revenue water ratio(%)
HJ	2,691.3	951.1	32.5	1,707.8	35.3%
SC	1,823.2	643.4	22.0	1,157.9	35.3%
KS1	2,363.6	416.5	14.2	1,932.9	17.6%
JJ	1,912.1	563.1	19.2	1,329.8	29.4%
KK	1,569.8	642.6	21.9	905.2	40.9%
KA2	2,718.2	493.3	16.8	2,208.1	18.1%
KS2	1,303.0	517.8	17.7	767.5	39.7%
JJ2	1,045.5	68.0	2.3	975.2	6.5%
JS	824.8	466.2	15.9	342.8	56.5%
OP	1,199.1	566.5	19.3	613.2	47.2%
DL	1,342.1	414.6	14.1	913.4	30.9%
KA1	1,386.7	148.8	5.1	1,232.9	10.7%
GD	1,702.6	590.9	20.2	1,091.6	34.7%
SD	1,429.0	484.0	16.5	928.5	33.9%
UL	5,152.3	1,461.3	49.9	3,641.1	28.4%
HL	3,734.6	1,783.2	60.9	1,890.5	47.7%
HS	2,755.9	1,335.9	45.6	1,374.4	48.5%
Sum(Zone H)	34,953.9	11,547.0	394.1	23,012.9	33.0%



Table 5. Status of revenue water ratio before improvement(2022) in Zone H

Block name	Flow (m ³ /d)	Usage (m ³ /d)	Apparent losses (m ³ /d)	Background leakage(m ³ /d)	Bursts leakage(m ³ /d)	Revenue water ratio(%)
HJ	1,987.5	1,014.8	34.6	105.4	832.7	51.1%
SC	1,418.2	796.5	27.2	271.0	323.5	56.2%
KS1	1,838.6	515.6	17.6	215.1	1,090.3	28.0%
JJ	1,233.4	629.2	21.5	152.0	430.7	51.0%
KK	1,159.2	685.6	23.4	164.9	285.3	59.1%
KA2	1,320.5	1,131.7	38.6	55.8	94.3	85.7%
KS2	1,013.6	641.0	21.9	63.9	286.7	63.2%
JJ2	772.1	72.5	2.5	30.0	667.1	9.4%
JS	641.6	577.1	19.7	27.1	17.8	89.9%
OP	885.5	604.5	20.6	81.3	179.1	68.3%
DL	991.1	442.4	15.1	49.6	484.1	44.6%
KA1	673.7	341.3	11.6	47.0	273.7	50.7%
GD	1,257.3	630.4	21.5	124.3	481.0	50.1%
SD	921.8	540.9	18.5	202.9	159.6	58.7%
UL	3,323.5	1,632.8	55.7	358.4	1,276.5	49.1%
HL	2,757.9	1,902.5	64.9	167.6	622.8	69.0%
HS	2,035.1	1,425.3	8.2	240.9	360.7	70.0%
Sum(Zone H)	24,230.6	13,584.1	423.2	2,357.2	7,866.1	56.1%

Table 6. Parameters for leakage component analysis in Zone H

Infrastructure condition factor(ICF)	Leakage detection efficiency	Leakage index(N1)	Meter dead rate
4 → 1	50%	1.5	3.3%

H 구역에 대한 개량후 누수성분분석을 위한 유수율 제고 전략별 매개변수는 Kim et al.(2022)의 연구결과에서 활용된 값과 동일한 값을 적용하였으며 각각에 대한 매개변수는 Table 6과 같다.

위에서 제시한 매개변수를 적용하여 개량후 누수성분분석을 시행한 결과는 17개 소블록별로 산정할 수 있었으며, 이중 HJ 소블록에 대한 분석결과는 다음과 같다(Fig. 2).

HJ 소블록의 경우 사업이전(2017년) 기준 유수율은 35.3%이고, 분석대상시점인 2022년 3월 유수율은 51.1% 그리고 개량후 누수량성분분석은 단계시험결과로 산정된 관로 연장당 누수량을 우선순위 기준으로 하여 관망정비와 누수탐사 및 복구를 총 24개 단계로 수행하였으며, 해당 소블록은 감압밸브에 감압이 불가능한 지역으로 본 분석에서는 제외하였다. 관

망정비와 누수탐사 및 복구 물량이 점차 증가할수록 유수율 향상 효율은 떨어지도록 산정되었으며, 이와 마찬가지로 H 구역에 대한 모든 소블록을 대상으로 개량후 누수량성분분석을 시행하였다.

3.1.2 경제성 분석 결과

경제성 분석의 경우에는 개량전후에 대한 누수량 성분분석 결과를 바탕으로 유수율 제고 전략별 물량과 누수저감량을 비용과 편익으로 각각 환산하여 적용하였다. 먼저 유수율 제고 전략별 물량에 대한 비용은 관망정비, 누수탐사, 누수복구, 수압관리, 계량기 교체 비용이 있으며, 관망정비와 수압관리 비용의 경우에는 다음과 같은 관경별 단가표를 통해 산정하였다. 관망정비에 대한 비용은 단순 설치가 아닌 교체공

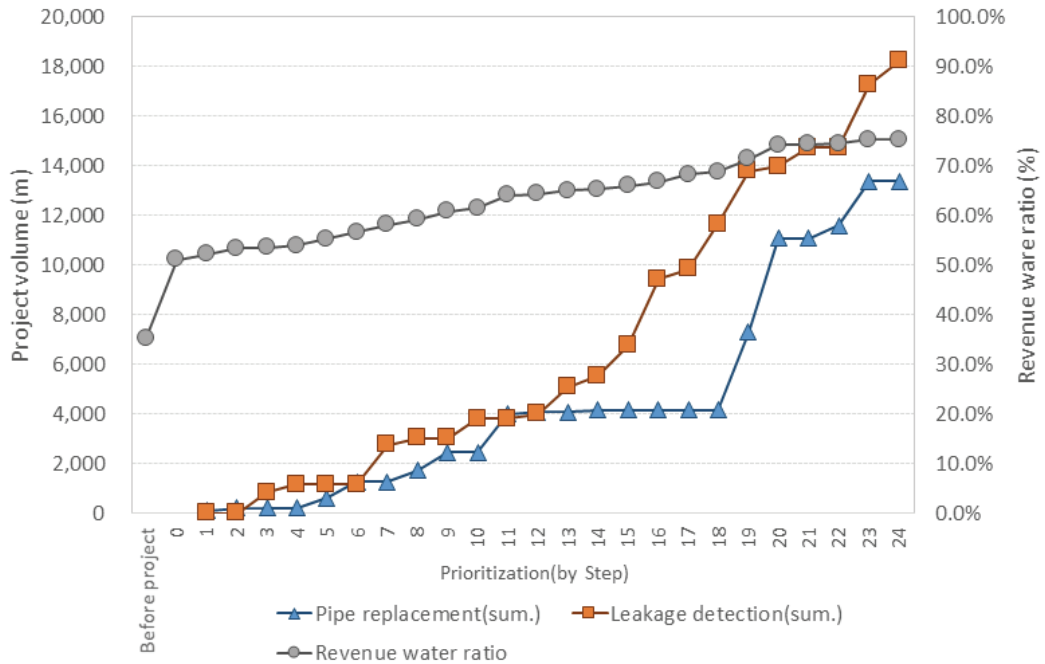


Fig. 2. Leakage component analysis results for HJ small block in Zone H.

Table 7. Criteria for applying pipe replacement cost in study area J

Diameter (mm)	Pavement Type(Won/m)			
	ASP	Con'C	Non	Surcharge Applied
13	161,793	127,279	28,078	218,421
16	161,793	127,279	28,078	218,421
20	161,793	127,279	28,078	218,421
25	162,964	128,281	28,643	220,001
32	164,632	129,725	29,503	222,253
40	164,714	129,807	29,585	222,364
50	170,481	134,899	32,927	230,149
60	175,863	139,831	36,693	237,415
65	183,602	147,008	42,412	247,862
75	183,602	147,008	42,412	247,862
80	183,602	147,008	42,412	247,862
100	191,340	154,185	48,131	258,309
125	236,098	197,818	88,848	318,732
150	252,086	212,682	100,796	340,315
200	268,073	227,546	112,744	361,899
250	314,739	271,964	151,330	424,898
300	362,268	317,245	190,779	489,062
350	402,525	355,254	222,956	543,409
400	466,505	416,986	278,856	629,781



Table 8. Criteria for applying pressure management cost by pipe diameter

Division	Cost(won)			
	D50~100mm	D150~200mm	D300	D400
PRV	10,000,000	15,000,000	30,000,000	40,000,000
Valve room	5,000,000			
TM/TC	10,000,000			
Construction	5,000,000			
Sum.	30,000,000	35,000,000	50,000,000	60,000,000

Table 9. Criteria for applying leakage detection cost surcharge rate by revenue water ratio

50% or less	50~55%	55~60%	60~65%	65~70%	70~75%	75~80%	More than 50%
0.8	0.9	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2

사이며, J 연구대상지역의 경우 도서지역으로써 도서 할증을 각각 20%, 15%를 적용하여 산정하였다(Table 7, 8).

그리고, 누수탐사 및 복구비용의 경우에는 J 연구대상지역의 과거이력자료를 이용하여 관로연장당 누수탐사 비용 및 복구비용으로 환산하여 각각 3,592,192 원/km/년, 5,594,817원/km/5년을 적용하였고, 누수탐사의 경우 해당 지역의 유수율 수준에 따라 누수탐사 난이도가 달라질 수 있어 다음의 누수탐사 할증율을 반영하여 산정하였다(Table 9).

누수저감량의 편익의 경우에는 누수량을 수돗물 생산원가를 적용하여 산정하였으며, J 연구대상지역의 유수율 제고사업의 경우 지속적인 사업이 아닌 일시적인 사업에 해당되며, 일시적인 유수율 제고사업으로 발생한 누수저감효과는 생산원가중 변동비용인 영업비용에 대한 편익만 포함시키는 것이 옳을 것으로 판단되어 누수저감량에 대한 원가산정시 영업비용만을 고려하여 853.43원/m³을 적용하여 산정하였다. 그리고, 비용과 편익에 대한 이자율은 고려하지 않았다.

이와 같은 방법으로 H 구역 중 HJ 소블록에 대한 경제성 분석을 수행한 결과는 다음과 같다(Fig. 3).

HJ 소블록에 대한 경제성분석 결과 B/C가 최대인 3.13일 경우 달성 가능한 유수율은 52.2%, B-C가 최대인 3.01일 경우에는 54.0%, B/C≥1 경우에는 66.8%가 달성 가능한 유수율 인 것으로 분석되었다. 이와 마찬가지로 H구역에 대한 모든 소블록을 대상으로 경제성 분석을 시행할 수 있었다.

H 구역의 17개 소블록에 대한 경제성 분석을 개별적으로 수행한 결과를 바탕으로 H구역 전체에 대한 B/C 최대, B-C 최대, B/C≥1 에서의 유수율, 소요사업비 및 B/C를 산정할 수 있었으며 산정결과는 다음과 같다(Table 10).

H 구역의 경우 유수율 제고 사업시 유수율 61.5% 달성시 B/C 최대, 유수율 62.0%에서 B-C 최대, 유수율 66.5%에서 B/C≥1(0.98)인 것으로 분석되었다. 여기서 H 구역은 17개의 소블록이 독립적으로 분리되어 있어 소블록별로 B/C분석을 수행하였으며, 소블록마다 B/C가 1이하인 부분도 있어 이를 총합계를 하면서 B/C가 1이하의 값으로 산정되었다. 그리고 사업 목표 유수율 70%를 달성하기 위한 소요사업비 및 B/C를 분석한 결과 소요사업비는 약 325억, B/C는 0.83인 산정되었다.

3.2 M 구역 적용결과

M 구역은 3개의 소블록으로 구성되어 있으며, 유수율 제고 사업은 2020년부터 추진된 것으로 하고, 분석대상시점은 2022년 4월 기준으로 분석을 진행하였다. 그리고 사업완료 시점은 분석대상시점으로 부터 5년 동안으로 설정하여 분석하였다. 분석대상시점에서는 유수율 제고방법중 관망정비, 누수탐사 및 복구, 수압관리로 한정하였고, 노후계량기 교체는 기 시행한 것으로 반영하였다.

Table 10. Economic analysis results for Zone H

Division	Max. B/C	Max. B-C	B/C \geq 1	Project target RWR 70%
Revenue water ratio(%)	61.5	62.0	66.5	70.0
Required project cost(100 million won)	164.4	166.6	263.8	325.0
B/C	1.41	1.41	0.98	0.83

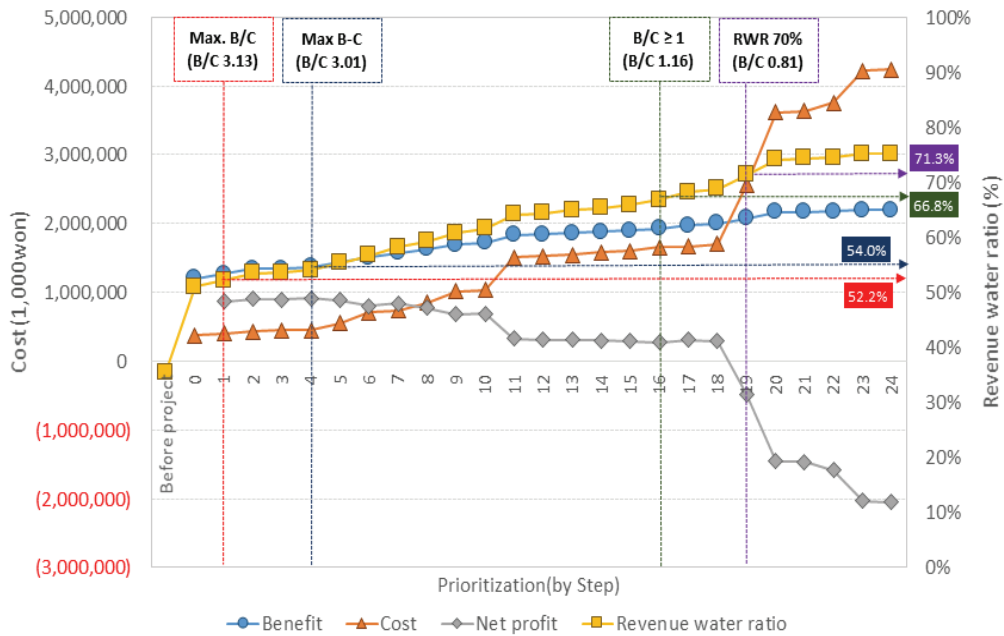


Fig. 3. Economic analysis results for HJ small block in Zone H.

3.2.1 누수량성분분석 결과

M 구역의 사업이전인 2020년도의 유수율은 31.7%이며, 이 때의 수용가정보, 관로정보, 검침 및 계측자료, GIS 등의 자료가 부족하여 분석대상시점인 2022년 4월 기준의 누수량 성분분석결과를 환산하여 다음과 같이 산정하였다(Table 11).

그리고, 분석대상시점 기준에 대한 누수량 성분분석은 2022년 4월에 대한 소블록별 공급량, 사용량 자료 및 GIS, 노후도 평가자료를 활용하여 산정하였고, 명목손실량은 분석대상시점에 노후 계량기 교체가 완료되어 H구역과 마찬가지로 전국 특광역시 평균 계량기 불감율인 3.3%를 기반영 하여 산정하였다. 그리고, 대상지역에 대한 단계시험결과를 반영하여 관로별 누수량을 재배분하였으며, 이렇게 산정된 개량전 누수량 성분분석결과는 다음과 같다(Table 12).

M 구역에 대한 개량후 누수성분분석을 위한 유수율 제고 전략별 매개변수는 H 구역과 마찬가지로 Kim et al.(2022)의 연구결과에서 활용된 값과 동일한 값을 적용하여 다음과 같이 산정하였다(Fig. 4).

M 구역의 경우 사업이전(2022년) 기준 유수율은 31.7%이고, 분석대상시점인 2022년 4월 유수율은 50.2% 그리고 개량후 누수량 성분분석은 단계시험결과로 산정된 관로 연장당 누수량을 우선순위 기준으로 하여 관망정비와 누수탐사 및 복구를 총 26개 단계로 수행하였으며, 해당 소블록은 감압밸브에 감압이 불가능한 지역으로 본 분석에서는 제외하였다. 개량후 누수 성분분석 결과, M 구역에 대한 사업 목표 유수율 75%를 달성하기 위해서는 약 24,000m의 관망정비 물량과 약 40,000m의 누수탐사 물량이 필요한 것으로 분석되었으며, 이는 M 구역의 총 배·급수관로 연장의 약 35%에 해당하는 관망정비 물량이다.



Table 11. Status of revenue water ratio before project(2022) in Zone M

Zone name	Flow (m ³ /d)	Usage (m ³ /d)	Apparent losses (m ³ /d)	Background and bursts leakage(m ³ /d)	Revenue water ratio(%)
Sum(Zone M)	16,150	5,120	175	10,856	31.7

Table 12. Status of revenue water ratio before improvement(2022) in Zone M

Block name	Flow (m ³ /d)	Usage (m ³ /d)	Apparent losses (m ³ /d)	Background leakage(m ³ /d)	Bursts leakage(m ³ /d)	Revenue water ratio(%)
Sum(Zone M)	10,192	5,120	175	495	4,403	50.2

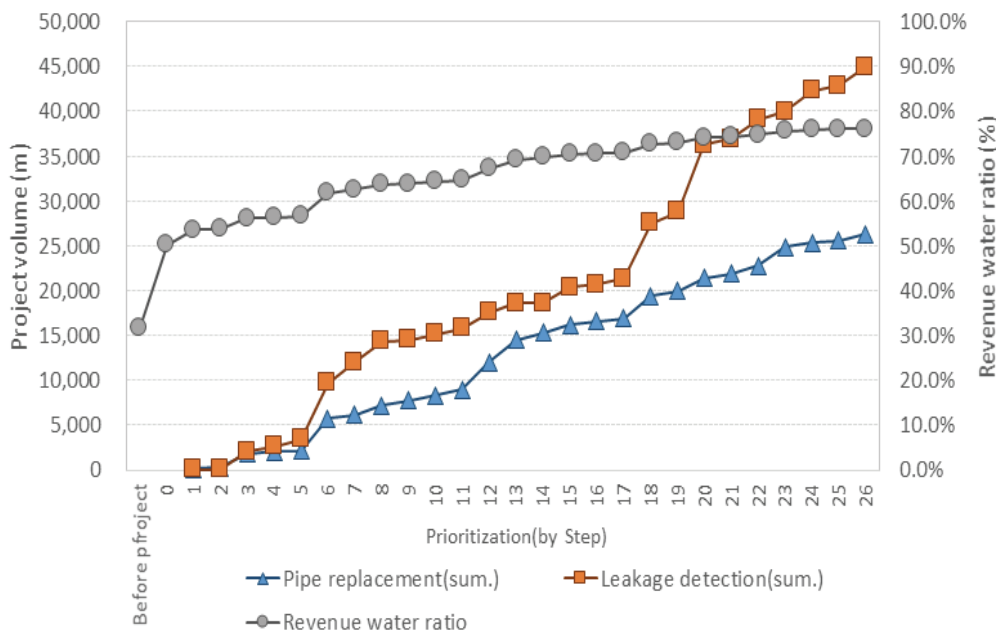


Fig. 4. Leakage component analysis results for Zone M.

3.2.2 경제성 분석

M 구역을 대상으로 경제성 분석 시행시 적용된 유수율 제고 전략별 비용 및 누수저감량에 대한 편익은 H 구역에 적용된 원단위와 동일한 수치를 적용하였으며, 이와 같은 방법으로 M 구역에 대한 경제성 분석을 수행한 결과는 다음과 같다(Fig. 5).

M 구역 유수율 제고 사업에 대한 B/C 최대, B-C 최대, B/C ≥ 1, 사업 목표 유수율 75%에 대한 달성 유수율, 소요사업비, B/C를 다음과 같이 산정할 수 있었다 (Table 13).

M 구역에 대한 유수율 제고 사업시 유수율 53.6% 달성시 B/C 최대, 유수율 61.8%에서 B-C 최대,

유수율 76.0%에서 B/C ≥ 1(1.29) 인 것으로 분석되었으며, M 구역에 대한 사업 목표 유수율 75%를 달성하기 위해서는 104.7억원이 소요되는 것으로 나타났다.

M 구역에 대한 분석결과를 달성가능 유수율에 대한 누수저감비용 및 누수저감편익에 대한 추세를 그려 관계식 식(3)과 같이 도출할 수 있었으며 그 결과는 다음과 같다(Fig. 6).

$$Y_1 = 12,627,103.75 \ln(X) + 18,224,937.56$$

$$Y_2 = 364,949.69e^{4.48X} \tag{3}$$

여기서, Y₁은 누수저감편익(천원), Y₂는 누수저감비

Table 13. Economic analysis results for Zone M

Division	Max. B/C	Max. B-C	B/C≥1	Project target RWR 75%
Revenue water ratio(%)	53.6	61.8	76.0	75.0
Required project cost(100 million won)	39.4	55.5	114.0	104.7
B/C	2.61	2.21	1.29	1.34

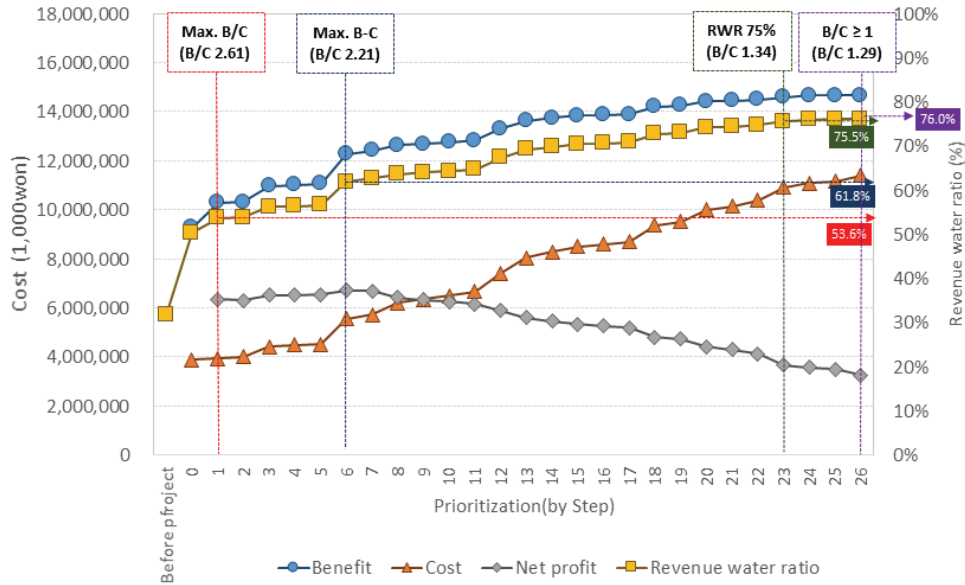


Fig. 5. Economic analysis results for Zone M.

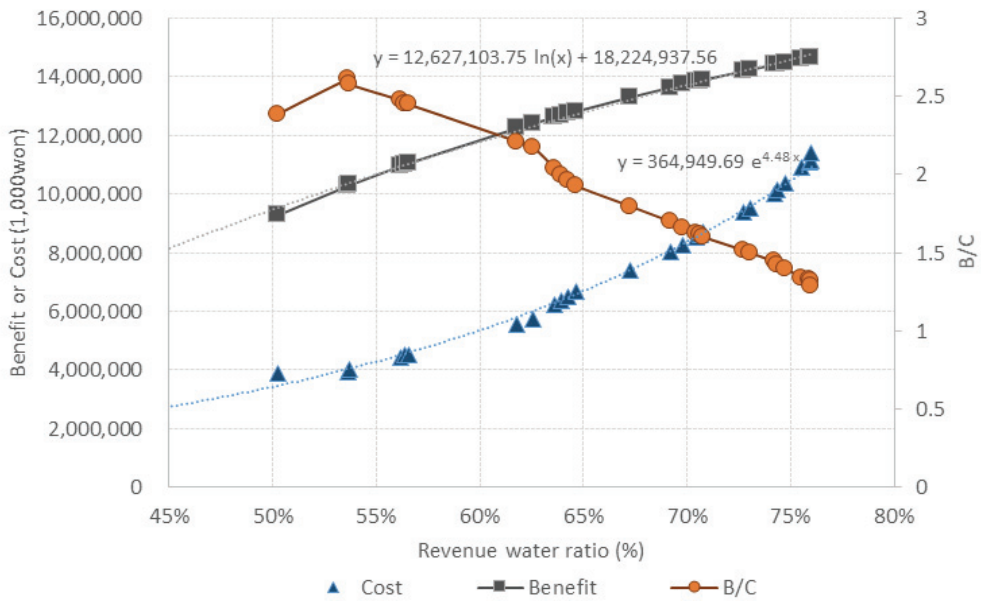


Fig. 6. Cost and benefit estimation curve calculation results by achievable revenue water ratio for Zone M.



Table 14. Comparison of project cost calculation results to improve revenue water ratio by 1% for Zone H and M

Division	RWR before project(%)	Achieved RWR(%)	Required project cost (100 million won)	Correction coefficient (total usage rate)	Project cost to improve RWR by 1% (100 million won)	
					Before correction	After correction
Zone H	33.0%	61.5%	164.4	0.87 (10,000/11,547m ³ /d)	5.768	5.018
		62.0%	166.6		5.745	4.998
		66.5%	263.8		7.875	6.851
		70.0%	325		8.784	7.642
Zone M	31.7%	53.6%	39.4	1.95 (10,000/5,120m ³ /d)	1.799	3.508
		61.8%	55.5		1.844	3.596
		76.0%	114		2.573	5.017
		75.0%	104.7		2.418	4.715

용(천원), X는 달성 가능 유수율(%)이며, 누수저감편익과 비용에 대한 관계식의 결정계수(R²)는 각각 0.9969, 0.9931으로써 본 분석결과에 의한 관계식을 활용하여 유수율 제고사업 물량, 소요사업비 및 달성 가능 유수율 등의 산정에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3 H 구역과 M 구역에 대한 분석결과 비교

경제성을 고려한 지방상수도 목표 유수율 산정 방법을 H구역과 M구역에 적용하였고, B/C최대, B-C최대, B/C≥1 그리고 각각 구역에 대한 사업 목표 유수율까지의 소요사업비와 향상된 유수율 증가량을 다음과 같이 산정하였다. H 구역과 M 구역의 전체 규모가 다르기 때문에 물사용량을 10,000m³/일로 표준화시키는 보정지수를 곱하여 유수율 1% 향상을 위한 소요사업비를 산정하여 비교하였다(Table 14).

산정결과 H 구역의 사업 목표 유수율 70% 달성을 위해 유수율 1% 향상당 소요사업비는 7.642억원이고 M 구역의 사업 목표 유수율 75% 달성을 위해 유수율 1% 향상당 소요사업비는 4.715억원으로 산정되었다.

이는 M구역은 망목상식 관망으로써 전체 관로 연장대비 수용가수 및 물사용량이 많고, 적은 유수율 제고 사업 물량으로도 유수율을 향상시킬 수 있는 것을 의미하며, 이와 같은 지역특성 및 관망운영 특성을 고려하여 소요사업비, 유수율 달성 가능량 등을 정량적으로 산정할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 경제성을 고려한 지방상수도 목표 유수율 산정 방법을 제안하였고, 이를 수치상식 관망 형태의 H 구역과 망목상식의 관망 형태인 M 구역을 대상으로 적용하였다.

적용결과, H 구역에서의 사업 목표 유수율 70%를 달성하기 위해서는 소요사업비 약 325억원이 필요하며, M 구역에서의 사업 목표 유수율 75%를 달성하기 위해서는 약 104.7억원이 필요한 것으로 산정되었다. H 구역과 M 구역의 사업규모를 물사용량 10,000m³/일로 보정할 경우 H 구역은 유수율 1% 향상을 위한 소요사업비는 7.642억원, M 구역은 4.715억원으로 산정되었다.

H 구역은 넓은 지역에 수용가가 분산되어 있고, 수지상식 관망으로 구성 및 관로 길이가 길어 동일한 유수율 상승 대비 소요사업비가 M 구역 대비 더 필요한 것을 의미하며, 이는 급수전 당 배수관 연장(H 구역 30.3 m/전, M 구역 19.2 m/전) 및 급수전당 총 관로 연장(H 구역 52.7 m/전, M 구역 23.1 m/전) 지표에서도 이러한 지역 특징들을 반영하고 있었다. 즉 J 연구 대상지역의 경우 H 구역보다는 M 구역에 대한 투입되는 사업비 대비 유수율 향상 효율이 더 높으며 이를 정량화시킬 수 있었다.

또한, 본 연구에서 제안한 방법을 통해 B/C별 달성 가능한 유수율을 산정할 수 있었으며, B/C최대, B-C최대, B/C≥1에 대한 각각의 달성 가능한 유수율을 산

정할 수 있었다. 특히, $B/C \geq 1$ 일때의 달성 가능한 유수율은 H 구역이 66.5%, M 구역이 76.0%로 분석되었다. 하지만, 지방상수도 유수율 제고 사업의 경우에는 사업추진 여부를 경제성 뿐만 아니라 복지개념도 함께 고려되기 때문에 단순히 B/C최대, B-C최대, $B/C \geq 1$ 으로는 사업 목표 유수율을 정할 수는 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 분석방법은 지역특성을 고려하여 사업 목표 유수율을 달성하기 위한 소요사업비, 해당 사업비에 대한 달성 가능한 유수율, 그리고 B/C 분석 등이 가능하여 유수율 제고 사업시 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구 누수량 성분분석에 사용된 매개변수에 대한 수치를 지역특성별로 정확히 제시되어 있지 못하고 있어, 다양한 지역을 대상으로 누수량 성분분석 방법을 적용하여 지역 특성별 적정 매개변수를 도출할 필요가 있고, 경제성 분석 시에는 비용과 편익항목, 적정 B/C에 대한 사회적 합의와 정책적 결정이 이루어져 분석절차가 매뉴얼화된다면, 본 연구에서 제안한 경제성을 고려한 지방상수도 목표 유수율 산정 방법의 활용도는 매우 높을 것으로 판단된다. 또한, 본 분석방법을 유수율 제고 사업화 단계에 제한하여 적용하였지만, 자연 유수율 저감율, 연차별 유수율 제고 물량 제시 등을 추가적으로 고려한다면 관망 운영 관리단계에 대한 분석에도 충분히 활용될 수 있어 지방상수도 누수관리 및 유수율 제고 사업 전반에 활용 가치가 클 것으로 판단된다.

References

- Choi, K., and Cho, J. (2014). Case study on the Jeollabuk-do local water supply efficiency by using DEA and Malmquist Index, *J. Digit. Converg.*, 12(12), 571-580.
- Ko, S., Lee, S., and Kwon, Y. (2015). "Analysis of the Efficiency of Local Waterworks Business", *Proceeding 2015 of The Korea Association for Local Government Studies*, South Korea, 271-298.
- Kim, N., Kim, S., and Lee, M. (2015). Waterworks Business Efficiency Analysis using Data Envelope Analysis, *KRUMA*, 28(4), 269-288.
- Choi, T., Kang, K., and Koo, J. (2015). Efficiency Evaluation of Leakage Management Using Data Envelopment Analysis, *J. Am. Water Works Assoc.*, 107(1).
- Kim, T., Choi, T., Kim, K., and Koo, J. (2015). A study on cost benefit analysis optimization model for water distribution network rehabilitation project of Taebaek region, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 29(3), 395-406.
- Kim, D., Kim, G., Son D., and Choi, T. (2022). Development and application of methodology for calculating revenue water ratio improvement strategy to achieve target revenue water ratio, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 36(6), 377-390.
- 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.