



상수도 관망에서의 경제적인 누수관리목표 산정 방안 연구

A Study on Setting Methods of Economic Level of Leakage in Water Pipe Networks

황진수¹·최태호¹·이두진¹·구자용^{2*}

Jinsoo Hwang¹·Taeho Choi¹·Doojin Lee¹·Jayong Koo^{2*}

¹한국수자원공사, ²서울시립대학교 환경공학부

¹K-water, ²K-water, Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

The estimation method of economical leakage management target utilized upon planning business for improvement of revenue water ratio in South Korea is presented and applicability of methods developed in this study is assessed through application on site. With a consideration of revenue water ratio in application target area, estimation method of long-term economical leakage management target is applied. Three leakage reduction methods such as replacement of residual aged pipe, leakage investigation and restoration and water pressure management are applied with a consideration of characteristics of site. Due to difficulty of obtaining data, analysis of cost/benefit by leakage reduction methods is performed by applying method of leakages estimation equation among statistical methods. As a result of application, revenue water ratio corresponding to long-term economical leakage management target is 91.6 %.

Key words: Cost/benefit analysis, Economic level of leakage, Revenue water ratio

주제어: 비용/편익 분석, 경제적인 누수수준, 유수율

1. 서 론

국제물협회(IWA, International Water Association)는 수도서비스 분야에 대한 새로운 수행능지표를 제안하였고 이의 성공적인 적용사례가 연이어 보고되고 있다. 이들 보고에 따르면, 특히 급수전당의 물소비량이 크게 차이는 지역 간에 백분율을 이용한 지표를 이용하여 수행능을 비교하지 말아야 한다고 말하고 있다. 누수관리목표를 설정하는데 기존에는 단순히 유수율을 이용하여 왔으나 이는 단순한 백분율 지표로 상수도 사업의 규모와 성격, 물 사용 특성, 대상지역의 지형이나 지질특성, 관망

상태, 재정적 규모와 현황 등을 고려하지는 않는다. 따라서 누수관리의 상황을 평가하고 적합한 목표로 사용하기에는 부적합하다. 이에 대해 국외에서는 효과적인 누수관리 및 목표수립을 위해 IWA Water Losses Task Force에 의해 누수평가지표(IL, Infrastructure Leakage Index)가 개발되었다(Lambert et al., 1999). 누수평가지표는 국제적 기준이나 국내적 운영 및 평가 기준(Carpenter et al., 2002), 소규모 시설의 기준으로 널리 사용되고 있다. 하지만 누수평가지표는 현재의 누수량과 허용 가능한 누수량의 비를 통해 대상지역의 누수를 평가할 수 있으나, 경제성과 누수저감 방법에 대한 고려가 이루어지지 않아 이후 경제적인 누수 수준(ELL, Economical Level of Leakage)과 경제적 누수평가지표(ELI, Economic Infrastructure Leakage)가 제시되었다(Lambert et al., 2005a). 이러한 지

Received 10 May 2017, revised 9 June 2017, accepted 12 June 2017

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

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

표들은 개념적으로는 이해할 수는 있지만, 누수관리를 위한 비용 및 누수관리를 통한 편익에 대한 계산 방법이 정확화 되어 있지 않아 우리나라에 그대로 적용하기에는 어려움이 따르고 이러한 문제점을 알고 있으면서도 체계적인 자료 수집 및 비용 등의 문제로 이를 대체할 수 있는 적합한 기술은 아직 국내에서 개발되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 실정에 적합한 최적의 누수관리목표 즉, 경제적인 누수관리목표 산정 방안을 제안하고자 하며, 경제적인 누수관리목표 산정을 통해 기존의 누수저감 및 방지 기법에 대한 분석과 기술 평가 그리고 우수율제고사업에 대한 효과적인 계획수립에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

최적의 우수율 제고를 위해서는 과학적인 진단방법을 통하여 적절한 누수저감대책을 수립하고, 내·외적인 다양한 원인에 의하여 발생하는 누수관리를 위한 단계적 절차를 수립하여 누수저감목표를 달성하여야 한다. 이는 누수수준에 따라 적절한 누수저감방법을 선택하여 비용대비 최고의 효과를 내기 위한 과정이다.

Fanner et al.(2007)는 누수저감방법에 따른 누수저감의 비용/편익을 다음 <Fig. 1>과 같이 나타내고 있다. 본 그래프는 거시적 수준의 감압, 누수 및 파손부위의 복구, 배경누수에 대한 복구, 정기적 누수탐사, 배수구역 모니터링, 미시적 수준의 감압, 자산교체의 순으로 누수저감방법을 적용하도록 제시하고 있으며, 누수저감비용 대비 편익이 크고 단기간에 우수율을

향상시킬 수 있는 누수저감방법을 먼저 적용하고, 시간이 좀 걸리더라도 장기적으로 우수율을 관리할 수 있는 방법을 나중에 적용하도록 제시하고 있다.

UK Water Industry(1994)에서는 관교체와 적극적인 누수탐사에 따른 직접 누수저감 편익을 계산한 바 있고, Smout et al.(2007)은 적극적인 누수탐사에 따른 탄소 배출량을 고려한 간접 누수저감 편익을 계산한 바 있으며, Lim et al.(2015)은 적극적인 누수탐사에 따른 직접 누수저감 편익을 계산한 바 있다. 그리고, Tripartite group(2002)에서는 현재누수수준을 결정 및 단계별 경제적 누수관리 목표 설정을 통해 적극적인 누수탐사에 따른 직접 및 간접 누수저감 편익 계산방법을 제시한 사례가 있다.

이와 같이 누수저감대책 수립시에는 누수저감방법에 따른 비용/편익을 분석하고, 이를 이용하여 누수저감절차를 결정한 다음, 경제적인 누수관리목표를 수립할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 우리나라의 실정에 맞게 우수율제고사업을 단기간에 우수율을 향상시킬 수 있는 우수율제고사업화단계와 장기적인 우수율 관리가 필요한 관망운영단계로 구분하여 각각의 누수저감방법에 따른 비용/편익분석을 통해 경제적인 누수관리목표 및 지표를 산정하고자 한다.

3. 경제적인 누수관리목표 산정 방안 제시

3.1 경제적 누수관리목표 산정 절차

본 연구에서는 경제적인 누수관리목표, 즉 경제적인 누수수준을 결정하기 위하여 ① 현재 누수수준

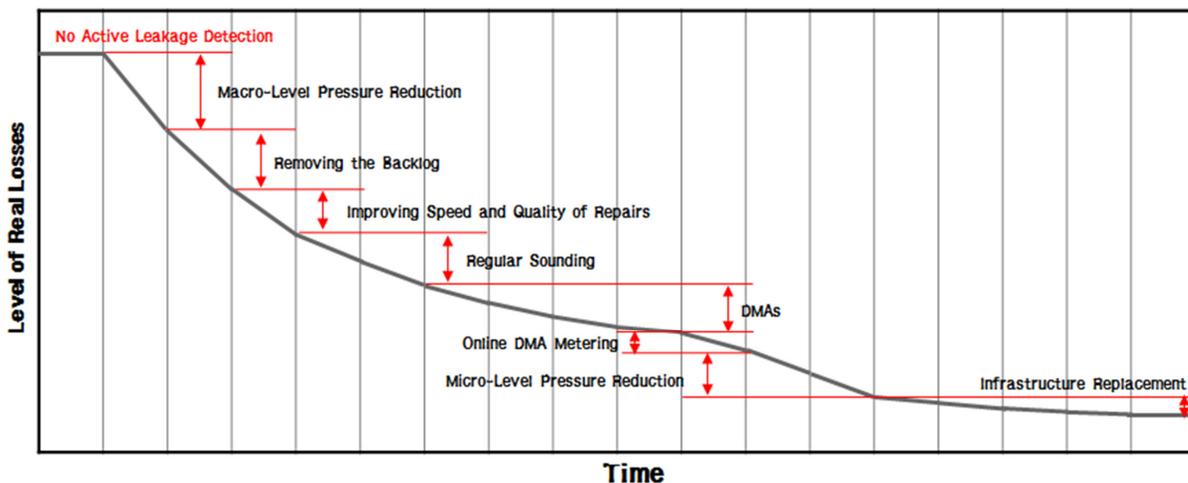


Fig. 1. Effectiveness by leakage reduced methods(Leakage management technologies.(Fanner et al., 2007)



결정, ② 경제적 누수관리목표의 단계적 설정, ③ 누수저감 비용 및 편익 계산, ④ 누수저감방법별 비용/편익 분석, ⑤ 단계별 경제적 누수관리목표 산정의 절차로 제시하고자 한다. 각 절차별 수행방법은 다음과 같다.

3.1.1 현재 누수수준 결정

경제적인 누수관리목표 산정을 위한 선행과정으로 현재 누수수준 결정이 필요하다. 그러나 현재 누수수준은 직접 측정할 수는 없지만, 배수시스템의 유입량과 수요량 및 야간최소유량 측정 등을 이용하여 현재 누수수준의 간접적인 계산은 가능하다. 계산방법으로는 야간최소유량접근법(Bottom up)과 통합유량접근법(Top down)의 2가지 방법이 있다. Bottom up 방식을 통한 누수량산정은 야간최소유량에서 합법적 야간사용량을 제외한 후 압력적용계수를 곱하여 계산이 가능하다. Top down 방식은 측정된 배수시스템의 유입량에서 수요량을 제외하여 연간 누수량을 산정하는 방법이다. 위의 두 가지 방법을 통해 산정된 누수량이 일치하여야 비교적 정확하게 누수량을 예측할 수 있다.

3.1.2 경제적인 누수관리목표의 단계적 설정

경제적 누수관리목표 산정 방안을 개념적으로 크게 우수율제고사업화단계와 관망운영단계로 구분하여 제시하고자 한다. 그러나 현실적인 측면에서는 두가지 단계를 엄밀하게 구분하기가 어려운데, 이는 두가지 단계에 공통적인 사항이 중복되어 있기 때문이다. 다만 개념적으로 정리하면, 우수율제고사업화단계는 단기 경제적 누수수준을 의미하고, 관망운영단계는 장기 경제적 누수수준을 의미한다. 우수율제고사업화단계에서는 누수저감활동에 들어간 비용대비 누수저감효과가 크게 증가하는 반면, 관망운영단계에서는 누수저감효과가 비교적 적게 증가한다. 그리고 우수율제고사업화단계와 관망운영단계에서의 경제적 누수관리목표는 해당 지자체의 재정상태나 규모에 따라 변동한다.

3.1.3 누수저감 비용 및 편익 계산

우수율제고사업화단계와 관망운영단계에 적용하는 누수저감방법은 차이가 있으며, 누수저감방법별 비용/편익 분석을 위해서는 각각에 대한 누수저감방법별 비용과 편익 계산이 수행되어야 한다.

일반적으로 우수율제고사업화단계에서의 누수저감을 위한 비용은 상수도시설물 조사(간접항목), 관망도 전산화

및 관리시스템 구축(간접항목), 블록시스템 구축 및 운영, 누수탐사 및 복구, 관망정비, 수압관리(거시적) 등의 항목에 대한 비용으로 구분할 수 있고, 관망운영단계에서의 누수저감을 위한 비용은 누수탐사 및 복구, 잔존노후시설교체, 수압관리(미시적), 그리고 관망도전산화/블록시스템 구축의 고도화 등의 항목에 대한 비용으로 구분할 수 있다.

누수저감에 의한 편익은 일반적으로 누수저감을 위한 비용에 비례하여 편익이 발생하게 되며, 누수저감에 의한 편익은 크게 직접편익과 간접편익으로 나눌 수 있는데, 직접편익은 누수저감활동을 통해 직접적으로 저감된 누수량을 의미하며, 간접편익은 누수량의 저감에 의한 사회적 및 환경적 편익과 같은 2차적인 편익을 의미한다. 이러한 직접편익과 간접편익은 누수저감활동을 통해 저감된 누수량으로 표현할 수 있으며, 저감된 누수량을 비용으로 환산하여 표현할 수도 있다.

3.1.4 누수저감방법별 비용/편익 분석

누수저감활동에 대한 효과는 대상지역의 현재 누수수준과 누수저감방법에 따라 달라지며, 이러한 특성이 존재하는 누수저감방법별 비용/편익 분석을 수행하기 위해서는 크게 실험적 방법과 통계적 방법으로 구분할 수 있다. 누수저감방법별 비용/편익 분석 방법의 자세한 내용은 다음과 같다.

(1) 실험적 방법

실험적 방법은 다음 <Fig. 2>와 같이 실제로 대상지역별로 여러 가지 누수저감방법 중 1가지씩의 방법들만 대상지역에 적용하여 대상지역별 누수저감방법의 적용 전후의 효과를 분석하여 각각의 누수저감방법에 대한 비용/편익 분석을 수행하는 방법이다. 즉, 누수저감방법별 비용/편익은 <식1>과 같이 계산할 수 있다. 여기서, C는 해당 대상지역에 적용한 누수저감방법에 대한 비용이고, L은 해당 대상지역에 대한 누수저감방법 적용 전후의 누수수준을 의미한다.

- 누수저감방법(1)에 대한 비용/편익 계산 = $C111/(L111-L112)$
- 누수저감방법(2)에 대한 비용/편익 계산 = $C112/(L211-L212)$
- ⋮
- 누수저감방법(k)에 대한 비용/편익 계산 = $C11k/(Ln11-Ln12)$ <식 1>

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

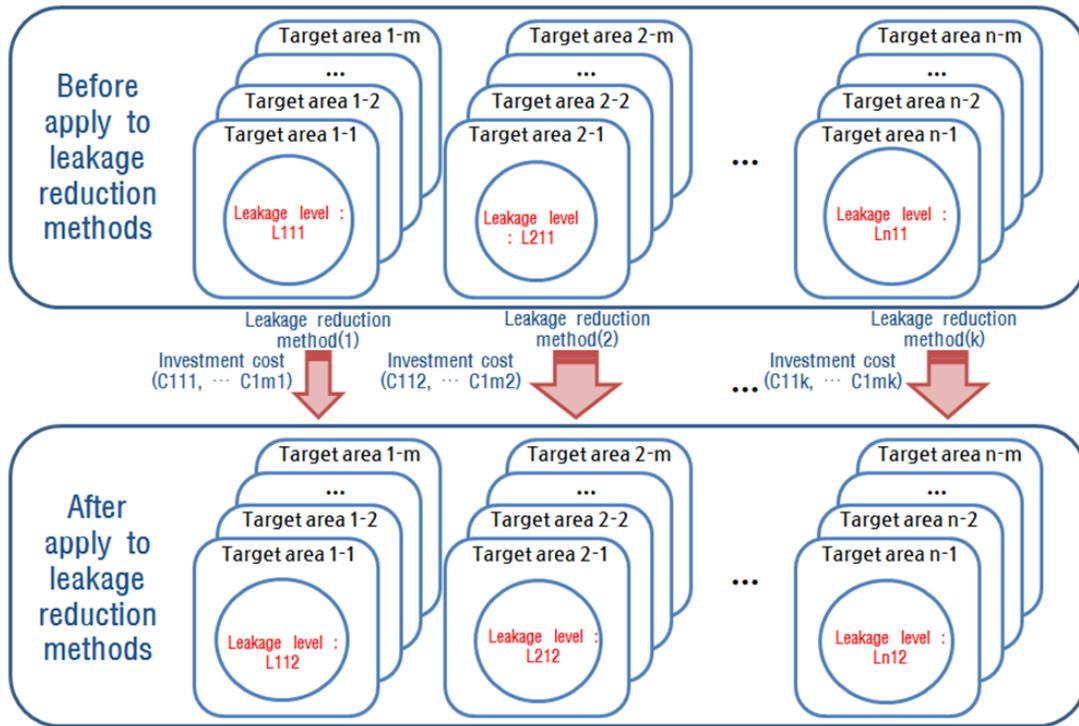


Fig. 2. Concept map of cost/benefit analysis by leakage reduction methods using Experimental methods.

이 방법은 유수율제고사업화단계와 관망운영단계 모두에서 적용할 수 있으며, 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있고, 누수저감방법별 비용/편익의 원단위를 계산할 수 있는 방법이다.

하지만, 실험적 방법을 적용하기에는 현실적인 어려움이 따른다. 이는 실험기간이 장시간 걸릴 뿐만 아니라, 실제로 현장적용 대상지역을 찾기가 매우 어려우며, pilot 규모에 실험적 방법을 적용할 경우에도 복잡한 상수관망을 재현하기 어렵기 때문에 실험적 방법을 통한 누수저감방법별 비용/편익 분석의 적용성이 떨어진다.

(2) 통계적 방법

통계적 방법은 과거의 누수저감활동자료와 누수수준 자료를 이용하여 통계적으로 누수저감활동에 대한 비용과 누수저감량을 추정하는 방법이다. 통계적 방법은 데이터의 확보 수준에 따라 다변량 분석과 누수량 추정식에 의한 방법으로 구분할 수 있다.

① 다변량 분석

통계적 분석 방법중 다변량 분석 방법은 과거의 누수저감활동자료와 누수수준 자료를 이용하여 중회귀

분석 및 수량화이론 등과 같은 다변량 분석방법을 통해 누수저감방법별 누수저감효과의 가중치를 계산하여 산정하는 방법이다. 다변량 분석 방법을 도식화하면 다음 <Fig. 3>과 같다.

이러한 결과는 다음의 <식2>와 같은 수식으로써 누수저감방법에 대한 비용 대비 효과를 계산할 수 있다.

$$Lx = 상수 + A1 \times C1 + A2 \times C2 + \dots + An \times Cn \quad <식 2>$$

여기서, Lx는 누수저감량이고 A1~An는 회귀계수, C1~Cn은 누수저감방법별 투자비용 변수를 의미한다. 따라서 위 식의 표준화된 회귀계수는 누수저감방법별 누수저감효과의 가중치를 의미하며 이를 이용하여 누수저감 방법별 비용/편익 분석 곡선을 작성할 수 있게 된다.

이러한 다변량 분석방법은 실험적 방법에 비하여 보다 현실적으로 실현가능하지만, 많은 대상지역의 데이터 수집이 요구되기 때문에 현장에 바로 이 방법을 적용하기 위해서는 사전준비가 필요하게 되며, 직접적인 누수저감효과를 얻기 쉽고 많은 누수저감방법

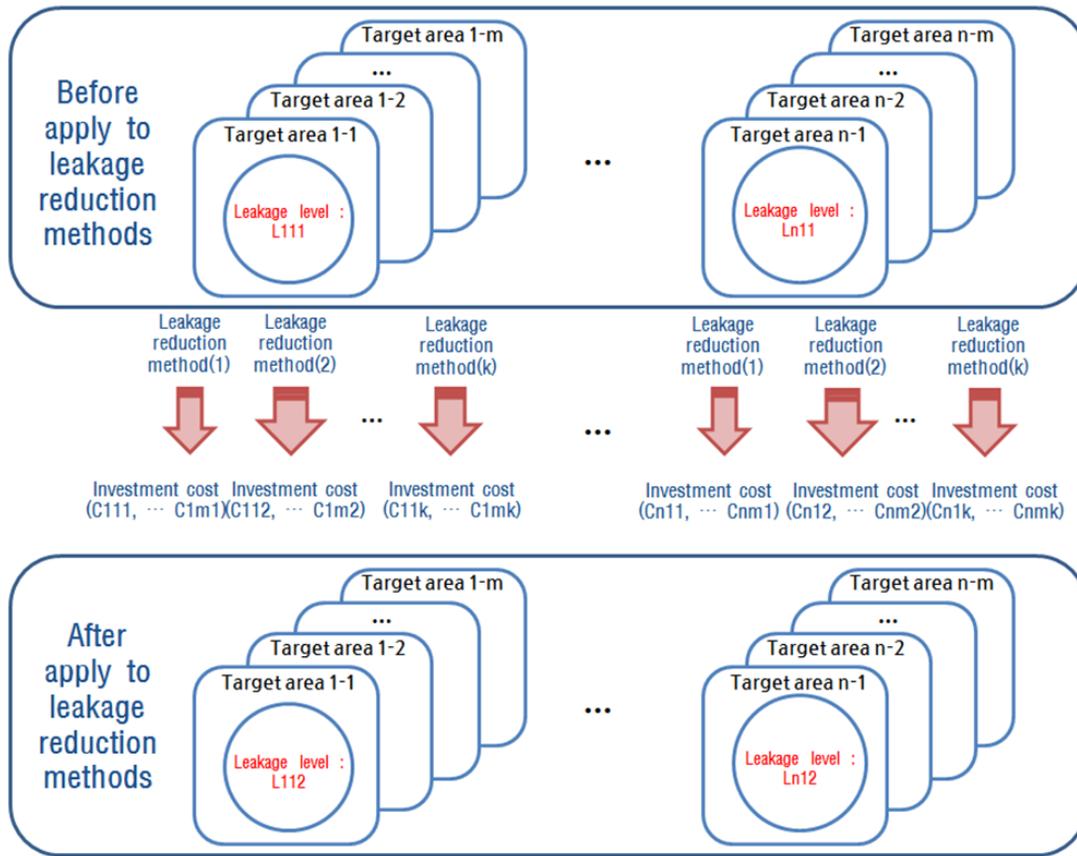


Fig. 3. Concept map of cost/benefit analysis by leakage reduction methods using statistical methods.

을 시행할 수 있는 관망운영단계에서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

② 누수량 추정식에 의한 방법

누수저감방법별 비용/편익 분석을 위해서는 누수저감방법의 적용 전후의 누수저감효과를 산정할 수 있어야 한다. 하지만 실제로 누수저감방법 적용을 통한 누수저감효과를 실험적으로 계산하기란 앞에서 설명한 바와 같이 매우 어렵다. 하지만, 누수저감방법의 적용 전후의 상수관망 상태 변화를 통해 간접적으로 누수량을 추정할수 있는 누수량 추정식을 이용한다면 이러한 문제를 비교적 간단히 해결할 수 있다.

누수량 추정식은 지역별 누수수준과 관경, 관종, 관연령, 누수이력 등의 운영관리자료를 이용한 중회귀분석 등의 통계적 방법을 통해 누수저감방법별로 작성할 수 있고, 이렇게 산정된 누수량 추정식을 이용하여 누수저감방법 적용 전후의 누수저감량을 추정할 수 있다. 누수량 추정식에 의한 누수저감방법별 비용/편익 분석의 개념도

는 다음 <Fig. 4>와 같으며, 누수저감방법별 비용/편익은 다음 <식 3>과 같이계산되어 진다. 여기서, C는 해당되는 누수저감방법에 대한 비용이고 L은 해당 대상지역에 대한 누수저감방법 적용 전후의 누수수준을 의미한다.

- 누수저감방법(1)에 대한 비용/편익 계산 = $C1/\Delta L1$
- 누수저감방법(2)에 대한 비용/편익 계산 = $C2/\Delta L2$
- ⋮
- 누수저감방법(k)에 대한 비용/편익 계산 = $Ck/\Delta Lk$ <식 3>

누수량 추정식에 의한 누수저감방법의 경우에는 상수도 관망상태의 변동에 따라 그 효과가 크게 차이가 나는 유수율제고사업화단계에 적용하면 보다 정확하게 산정할 수 있을 것으로 판단되나, 앞에서 설명한 실험적 방법과 다변량 분석방법에 비해 정확도는 낮을 것으로 판단된다.

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

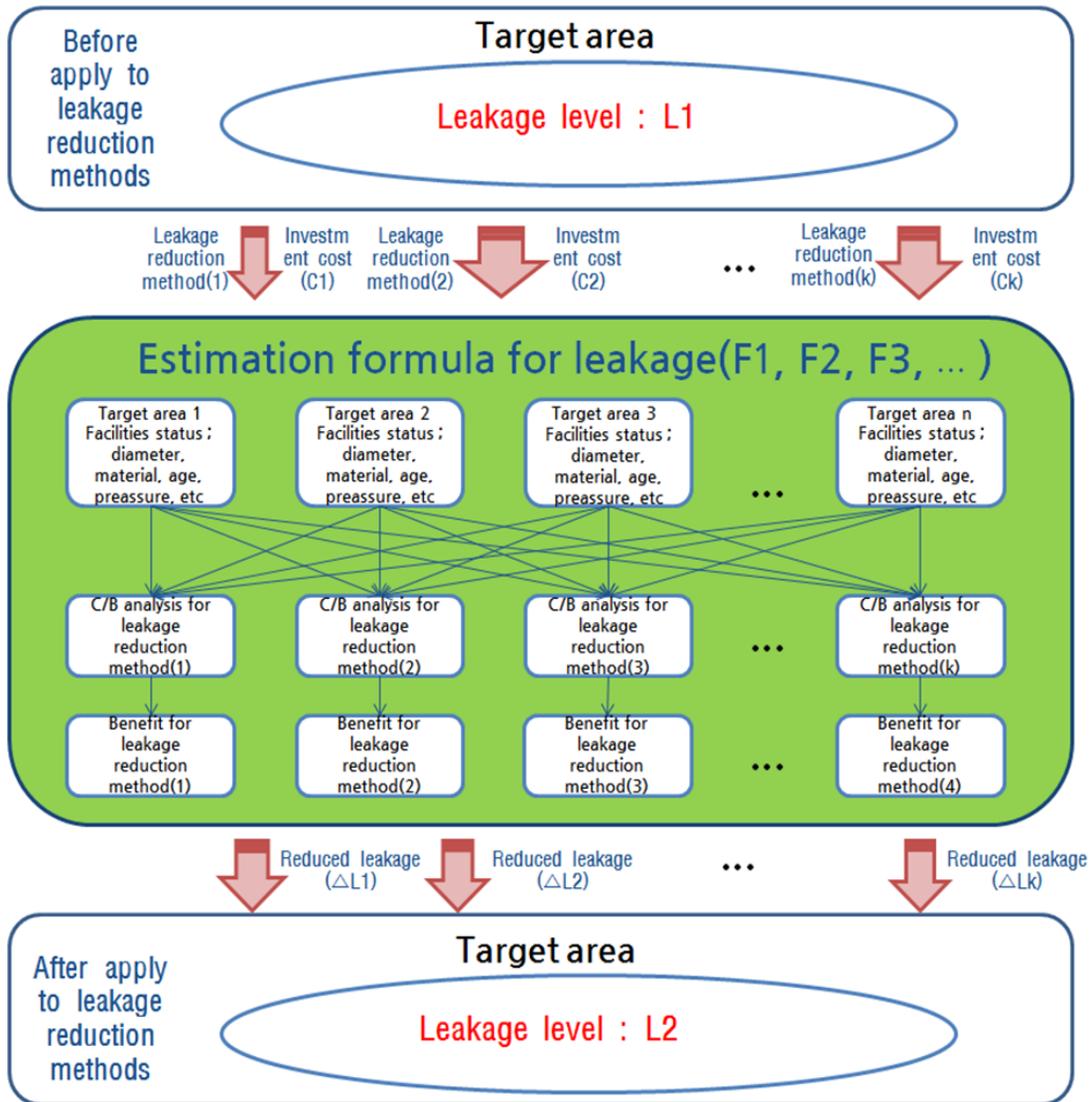


Fig. 4. Concept map of cost/benefit analysis by leakage reduction methods using leakage estimation formula.

3.1.5 단계별 경제적 누수관리목표 산정

누수저감방법별 비용/편익의 분석이 완료되면 누수저감방법의 조합에 의한 경제적인 누수관리목표를 설정할 수 있다. 경제적인 누수관리목표는 단기목표와 장기목표로 구분하여 단계별로 설정하게 되는데 단기 경제적인 누수관리목표는 우수율제고사업화단계에서의 목표에 해당하고 장기 경제적인 누수관리목표는 관망운영단계에서의 목표에 해당한다.

단기 및 장기 경제적인 누수관리목표는 다음 <Fig. 5>와 같이 누수수준에 따른 누수저감방법별 비용/편익 분석의 결과를 이용하여 누수관리를 위한 최적의 누수저감방법을 조합하고, 조합된 누수저감방법의 비

용/편익 분석을 통해 최소의 비용이 발생하는 누수수준을 찾는 방법이다. 그리고, 이러한 누수저감방법의 조합을 대상지역에 적용하면 경제적인 누수관리목표를 달성할 수 있다.

누수저감방법별 비용/편익 곡선의 조합은 <Fig. 5>와 같이 일반적으로 “아래로 볼록”인 형태를 갖게 되는데 이는 초기에 누수저감을 위한 비용을 증가시킬 경우에는 누수저감 효과가 점점 크게 나타나지만 인프라구축이 완료되고 누수저감도 어느정도 달성하게 되면 그 비용대비 효과가 떨어지기 때문이다.

경제적인 누수관리목표 산정을 위한 누수저감방법의 조합은 비용대비 편익이 큰 것부터 순차적으로 적용하여

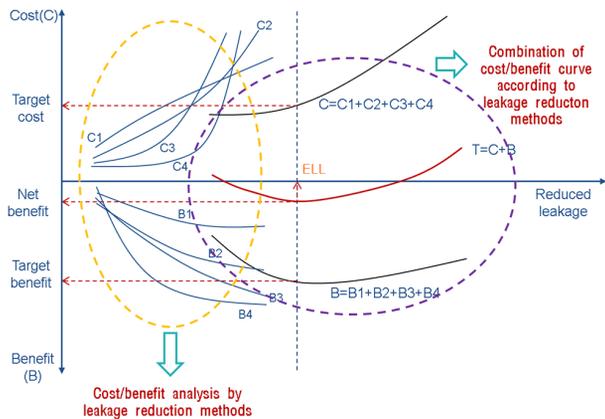


Fig. 5. 경제적인 누수관리목표 산정 방법의 개념도.

계산할 수 있다. 누수저감을 위한 비용단위를 크게 할 경우에는 <Fig 5>와 같이 도식화 하여 최대의 순 편익이 발생하는 누수저감방법을 도출하면 되지만, 보다 정확한 경제적인 누수관리목표 산정을 위해서는 누수저감을 위한 비용단위를 미세하게 나누고, 이때 계산반복수가 매우 많아지기 때문에 선형계획법, 동적계획법, 유전자알고리즘, 담금질기법 등과 같은 최적화이론을 이용하면 간단하게 계산할 수 있다. 단계별 경제적인 누수관리목표설정을 위한 보다 자세한 내용은 다음과 같다.

3.2 경제적 누수관리목표의 활용

단기 및 장기 경제적인 누수관리목표가 산정되면, 각 단계별 누수저감활동을 위한 투자비용을 산정할 수 있을 뿐만 아니라, 경제적인 누수수준까지의 누수저감방법의 우선순위와 투자비용을 결정하는데 활용할 수 있다. 그리고 경제적인 누수수준을 결정할 수 있기 때문에 경제적인 누수관리가 잘되고 있는지를 판단하기 위한 경제적인 누수관리지표를 산정할 수도 있다.

본 연구에서 제시하는 경제적인 누수관리지표는 다음 <식 4>, <식 5>와 같다.

$$SELI = \frac{CARL}{SEARL} \quad \text{<식 4>}$$

$$LELI = \frac{CARL}{LEARL} \quad \text{<식 5>}$$

여기서,

SELI: 단기 경제적인 누수관리지표
(Short-Economic Infrastructure Leakage Index)

- LELI: 장기 경제적인 누수관리지표
(Long-Economic Infrastructure Leakage Index)
- CARL: 연간실손실량
(Current Annual Real Losses)
- SEARL: 단기 경제적인 연간실손실량
(Short-Economic Annual Real Losses)
- LEARL: 장기 경제적인 연간실손실량
(Long-Economic Annual Real Losses)

여기서 SELI는 단기 경제적인 누수관리지표로서 우수올제고사업화를 추진하고 있는 대상지역이 우수올제고 사업화단계의 목표유수율을 달성하였는지, 또는 달성하지 못하였다면 상대적으로 얼마나 달성하지 못하였는지를 판단할 수 있는 지표이다. SELI의 값이 1일 경우에는 단기 경제적인 누수관리목표에 달성한 것으로 판단할 수 있으며, SELI가 1에 가까울수록 단기 경제적이 누수관리 목표에 보다 더 근접한 것으로 판단할 수 있다.

그리고, LELI는 장기 경제적인 누수관리지표로써 우수올제고사업화단계에서의 목표유수율을 달성한 이후 관망운영단계에서 경제적으로 누수관리가 진행되고 있는지를 평가할 수 있는 지표이다. LELI의 값이 1일 경우에는 장기 경제적인 누수관리목표를 달성한 것을 의미하고, LELI가 1보다 클 경우에는 장기 경제적인 누수수준을 달성하기 위하여 누수저감노력이 더 필요함을 의미한다. 또한 LELI가 1보다 적을 경우에는 누수저감 활동에 투자되는 비용대비 누수저감효과가 적어 비경제적인 누수관리를 수행하고 있는 것을 의미한다.

이와 같이 본 연구에서 개발된 경제적인 누수관리목표 설정방법과 경제적인 누수관리지표를 이용하면 상수관망에서 경제적으로 누수관리가 되고 있는지를 평가할 수 있으며, 평가결과에 따라서 누수관리계획을 보다 합리적으로 수립할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 기존의 국외에서 제시한 ILI와 ELI의 적용한계를 극복하고 국내실정에 맞는 경제적인 누수관리지표를 제시할 수 있다는 측면에서 큰 의미가 있을 것으로 판단된다.

4. 경제적인 누수관리목표 산정방법의 적용사례 분석

본 연구에서 제시한 경제적인 누수관리목표 산정방

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

법의 적용사례 분석을 통해 현장 적용 가능성을 검토하였다. 누수저감방법은 누수저감방법별 비용과 편익 산정이 용이한 노후관 교체, 누수탐사 및 복구, 수압 관리 방법을 적용하고, 누수저감방법별 비용/편익 분석 방법은 데이터 확보가 비교적 용이한 누수량 추정 방법을 적용하였다. 적용대상지역은 S시 A구와 B구로써 블록시스템 및 관망정비사업이 진행중이거나 완료된 상태이기 때문에 관망운영 단계에 있어 장기 경제적인 누수관리목표 산정에 적용하였다.

4.1 적용대상지역 현황

경제적인 누수관리목표 산정방법 적용대상지역은 S시의 A구와 B구이며, 이 지역은 68 개 소블록으로 구성되어 있고, 2009년도 기준 급수인구는 494,469 명, 1 인당 GRDP(Gross Regional Domestic Product)는 연간 16,097,600 원으로 주거, 상업, 공업 지역이 혼재되어 있는 지역이다. 전체 상수도 관로 연장은 약 781 km이고, 유수율은 75.8 %이며 전체 급수전수는 90,079 전이다.

4.2 관로 교체에 의한 블록 누수량 추정식 산정

관로 교체에 의한 블록 누수량 추정식은 관중, 관경, 관연령을 독립변수로 하고 블록 누수량을 종속변수로 하여 중회귀분석방법을 활용하였다. 관중, 관경, 관연령 자료는 GIS 시설물 자료를 이용하였고, 블록 누수량은 블록 유입량, 블록 유입수압, 블록 요금수량 등의 자료 활용하여 산정하였다. 분석에 사용된 각 블록의 운영자료는 2007 년부터 2009 년까지 자료로써

실시간 블록 유입량 및 유입수압 측정이 가능한 63 개 소블록을 대상으로 수집하였다.

중회귀분석을 위해 필요한 자료들을 다음 <식 6>과 같이 행렬 형태로 정리하였다.

행렬식에서 $L_{n, Type, D, Y}$, Q_n , P_n 은 GIS 자료와 운영 자료로부터 알 수 있는 값들이고, N1은 동일한 적용대상지역에서 기 산정된 문헌(Sustainable Water Resources Research Center, 2011)을 근거로 1.65로 가정하여 계산하였다. 중회귀분석을 이용하여 산정된 블록 누수량 추정식은 다음 <식 7>과 같이 나타났다.

중회귀분석은 SPSS 18을 사용하여 분석을 실시하였으며, 각 블록의 관중, 관경, 관연령별 관 연장을 독립변수로 하고 누수량을 종속변수로 하여 분석을 실시함으로써 누수량을 추정할 수 있는 중회귀모델을 구축하였다. 중회귀분석을 통해 얻어진 회귀계수는 <식 6>의 $Ca_{Type, D, Y}$ 을 의미하고, 투입된 독립변수인 $L_{TypeiDjYk}(i=1\sim9, j=1\sim4, k=1\sim4)$ 에 의해 추정된 144개의 회귀계수는 코드상으로는 존재하나 실제 데이터가 없는 코드가 많아 32개의 회귀계수만을 사용하였다. 산정된 중회귀모델의 R2는 0.9396으로 나타나 제시된 모델이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

적용대상지역 전체의 실제 누수량은 연간 925,108 m³이며 수압을 50 m로 환산할 경우 누수량은 연간 864,392 m³이다. 여기서 수압을 50 m로 환산한 이유는 N1적용을 통한 누수량 추정식은 평균 수압 50 m를 가정한 값이기 때문이다. 이에 대해 블록 누수량 추정식을 이용하여 적용대상지역 전체의 누수량을 추정한 결과 연간 누수량은 743,174 m³으로 실제 연간 누수량과

$$\begin{pmatrix} L_{1, Type1, D1, Y1} \cdots L_{1, Type9, D4, Y4} \\ \vdots \\ L_{n, Type9, D1, Y1} \cdots L_{n, Type9, D4, Y4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ca_{Type1, D1, Y1} \\ \vdots \\ Ca_{Type9, D4, Y4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ P_1^{N1} \\ \vdots \\ Q_n \\ P_n^{N1} \end{pmatrix} \quad \text{<식 6>}$$

여기서,

$L_{n, Type, D, Y}$: n블록의 코드 분류에 따른 관중, 관 직경, 관연령에 대한 관연장

$Ca_{Type, D, Y}$: 코드분류에 따른 관중, 관경, 관연령에 대한 유속계수와 누수면적의 곱

Q_n : n블록의 누수량

P_n : n블록의 평균 운영 수압

N1 : 누수지수



$$Q_{Leakage} = 234,407.44$$

$$\begin{aligned}
 &+ L_{Type3D1Y1} \times -803.48 + L_{Type3D1Y3} \times 401.69 + L_{Type3D1Y4} \times 3,179.71 + L_{Type4D1Y2} \times 34.00 + L_{Type4D1Y3} \times 180.74 \\
 &+ L_{Type4D1Y4} \times 597.21 + L_{Type3D2Y1} \times -74.58 + L_{Type3D2Y2} \times 32.40 + L_{Type3D2Y3} \times 208.98 + L_{Type3D2Y4} \times 899.46 \\
 &+ L_{Type4D2Y2} \times 21.50 + L_{Type4D2Y3} \times 786.78 + L_{Type4D2Y4} \times 1,324.54 + L_{Type2D3Y3} \times 212.16 + L_{Type2D3Y4} \times 4,622.27 \\
 &+ L_{Type6D3Y3} \times 169.84 + L_{Type6D3Y4} \times 241.46 + L_{Type1D4Y1} \times -379.84 + L_{Type1D4Y2} \times -181.18 + L_{Type1D4Y3} \times 1,245.00 \\
 &+ L_{Type1D4Y4} \times 7,916.00 + L_{Type2D4Y2} \times 84.96 + L_{Type2D4Y3} \times 536.00 + L_{Type2D4Y4} \times 2,356.07 + L_{Type6D4Y1} \times -13.22 \\
 &+ L_{Type6D4Y2} \times 21.54 + L_{Type6D4Y3} \times 984.15 + L_{Type6D4Y4} \times 2,654.67 + L_{Type9D4Y1} \times -74.94 + L_{Type9D4Y2} \times 215.70 \\
 &+ L_{Type9D4Y3} \times 1,436.19 + L_{Type9D4Y4} \times 8,173.44
 \end{aligned}$$

Material	Diameter(mm)
Type1: Steel pipe(SP)	D1: 15-25
Type2: ductile cast iron pipe(DP)	D2: 30-50
Type3: Stainless steel pipe(ST)	D3: 65-200
Type4: Galvanized Steel Pipe(GP)	D4: 250-1200
Type5: Poly vinyl chloride pipe(PVC)	Year(yr)
Type6: Cast iron pipe(CIP)	Y1: Under 10
Type7: Polyethylene pipe(PE)	Y2: 10~20
Type8: HI-3P	Y3: 20~30
Type9: Etc	Y4: Over30

<식 7>

는 14 %의 오차율이 나타났다. 이와 같이 오차율이 나타난 이유는 누수량 추정식에 사용된 독립변수가 관종, 관경, 관연령으로 한정되어 있기 때문이며, 누수량에 보다 밀접하게 영향을 주는 인자를 누수량 추정식 산정에 추가할 수 있다면 보다 정밀한 누수량 추정식을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 경제적인 누수관리목표 산정을 위한 비용/편익 분석시 정확한 누수량을 이용하기 보다는 누수저감활동에 대한 누수량 변화량을 활용하는 것이기 때문에 본 연구에서 산정된 누수량 추정식의 활용은 적정하다고 판단된다.

4.3 누수저감방법별 비용/편익 분석

본 연구의 적용대상지역에서 적용한 누수저감방법은 노후관교체, 누수탐사 및 복구, 수압관리이며, 각각의 누수저감방법별 비용/편익 분석 결과는 다음과 같다.

4.3.1 노후관 교체

본 연구에서 산정된 블록 누수량 추정식에 각 관로의 자료를 넣어 현재의 누수량을 추정하고 관로 교체 공사 후에 대한 새롭게 갱신된 관망 자료를 활용하여 블록 누수량을 다시 추정하였다. 이 두 블록 누수량의

차는 관로 교체 공사에 의한 누수저감량이며, 이렇게 산정된 누수저감량과 수돗물 생산비용을 통해 누수저감의 직접편익을 구하고, 관로 교체공사에 의한 관로의 잔존가치 변화를 통해 간접편익을 계산하였다. 이때 관 교체에 필요한 공사비용을 투입비용으로 하였다. 관로 교체주기를 30 년으로 가정하여 공사비용은 30 년간 상환하는 것으로 계산하였고, 블록 누수량 저감에 의한 이득은 10 년 후를 목표로 평가하였다. 이는 누후관을 교체하더라도 시간이 흐름에 따라 누수량이 다시 증가하기 때문이다.

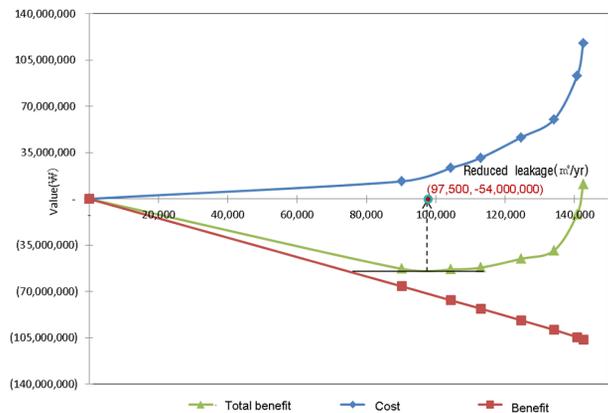


Fig. 6. Results of cost/benefit analysis for aged pipe replacement.

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

이와 같이 적용대상지역의 노후관 교체에 의한 비용과 편익은 다음 <Fig. 6>과 같으며, 노후관 교체에 의한 비용 대비 편익이 큰 관로 유형순으로 교체한 결과이다. 노후관 교체만을 수행 했을시 가장 경제적인 누수저감량은 97,500 m³/yr이고 이때의 비용은 18,000 천원이고, 편익은 71,000 천원이며, 총 편익은 54,000 천원으로 계산되었다.

4.3.2 누수탐사 및 복구

누수탐사 및 복구에서의 비용은 누수에 대한 탐사 비용과 탐지된 누수와 보고된 누수에 대한 복구비용으로 산정하고, 직접편익은 누수탐사 효율에 따른 누수저감량으로 산정하고, 간접편익은 누수사고시간 감소에 대한 사회적 이득으로 산정하였다.

$$Benefit_{social} = No \times (T - t) \times gr \times Pop \quad \text{<식 8>}$$

여기서,

$Benefit_{social}$: 사고시간 감소에 의한 사회적 이득(원)

No : 연간 사고건수(건)

T : 평균 수리시간(사고 지속시간)(hr)

t : 목표 수리시간(hr)

gr : 1인당 지역내 총생산(원)

Pop : 사고영향을 받는 인구수(인)

일반적으로 누수탐사 효율은 10~15 %로써 본 연구에서는 10 %로 가정하였고, 1회 누수탐사와 복구비용은 수도정비기본계획 표준품셈을 이용하였다.

적용대상지역에서 다른 누수저감활동은 배제하고 누수탐사 및 복구만을 수행한다고 가정하였을 때

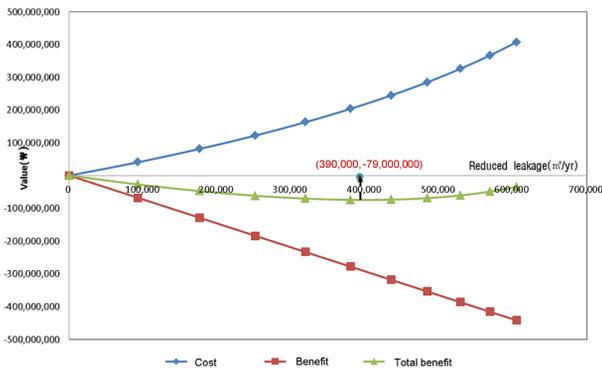


Fig. 7. Results of cost/benefit analysis for leakage investigation and restoration.

누수탐사 및 복구에 대한 비용과 그에 대한 누수저감 효과의 편익을 1년 동안의 누수탐사 건수별로 계산하여 누수탐사가 1회에서 10회까지의 비용/편익 곡선을 작성하였다. 그 결과는 다음 <Fig 7>과 같다.

그 결과, 가장 경제적인 누수탐사횟수는 5.2 회/년 정도인 것으로 나타났으며, 이때의 누수저감량은 390,000 m³/년, 비용은 212,000 천원, 편익은 287,000 천원 그리고 총 편익은 79,000 천원으로 산정되었다.

4.3.3 수압관리

오리피스식으로부터 누수량은 관내 수압, 누수부위의 면적 및 형상에 따라 달라짐을 알 수 있다. 이러한 원리에 의해 관로상의 누수를 저감시키는 방법이 수압관리로써, 수압관리에 의한 누수저감량은 다음 <식 9>를 통해 계산할 수 있다.

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N1} \quad \text{<식 9>}$$

여기서,

L_0, L_1 : 환산 후 및 환산 전의 누수량(m³/년)

P_0, P_1 : 환산 후 및 환산 전의 수압(m)

$N1$: 적용하는 지수, 1.65사용

수압관리를 위한 비용은 감압밸브와 이를 기록·관리할 TM 등 부대시설의 재료비, 그리고 설치비용이 포함된다. 수압관리에 의해 얻을 수 있는 편익은 누수량저감에 의한 직접편익과 감압밸브 잔존가치 향상에 의한 간접편익으로 구분할 수 있다. 이 중에서 잔존가치 향상에 의한 간접편익은 감압밸브가 설치되어 있지 않는 경우에는 산정할 수 없고, 밸브류에 대한 적절한 내구년한에 대한 자료가 없기 때문에 직접편익의 경우에 대해서만 적용하였다.

블록당 1개의 감압밸브만 설치 가능하다고 가정하고, 적용대상지역의 실시간 블록 유입량 및 유입수압 측정이 가능한 63개 소블록 중 감압밸브 설치가 가능한 9개 소블록을 대상으로 적용하였다. 9개 소블록의 감압밸브 설치에 의한 비용/편익 곡선은 다음 <Fig. 8>과 같이 나타났다.

그 결과 누수저감 활동중 수압관리만을 수행 하였을 때 가장 경제적인 누수저감량은 870,000 m³/년으로 계산되었고, 이때의 비용은 240,000 천원, 편익은 644,000 천원, 그리고 총 편익은 405,000 천원으로 계산되었다.

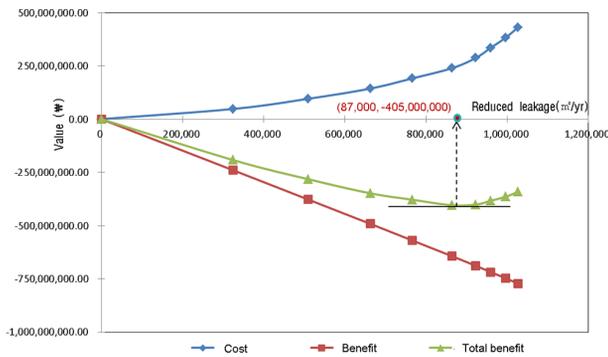


Fig. 8. Results of cost/benefit analysis for water pressure management.

4.4 장기 경제적인 누수관리목표 설정

본 연구의 적용대상지역에서 누수저감방법별 비용/편익을 수행하였고, 이 결과를 이용하여 관망운영단계에서의 경제적인 누수관리목표, 즉 장기 경제적인 누수관리목표를 산정할 수 있다.

장기 경제적인 누수관리목표의 산정은 앞에서 적용한 3가지 누수저감방법을 단위 편익/비용에 대한 효율이 최대치인 것부터 순차적으로 적용하면 다음 <Fig. 9>와 같이 나타낼 수 있다.

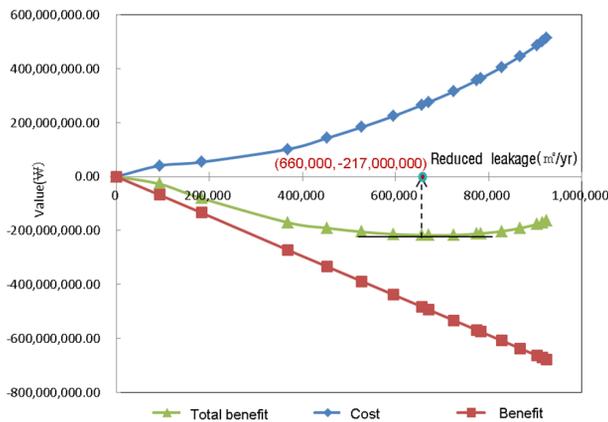


Fig. 9. Establishment results of long term economical leakage management target.

Table 1. Cost and benefit according to leakage reduced methods for long-term economical leakage management target

Leakage reduced methods	Reduced leakage (m ³ /yr)	Cost (won/yr)	Benefit (won/yr)	Total benefit (won/yr)
Replacement of residual aged pipe	380,399	203,799,713	277,957,668	74,157,956
Leakage investigation and restoration	93,989	13,241,850	66,151,907	52,910,057
Water pressure management	185,612	47,872,595	138,015,979	90,143,384

적용대상지역의 장기 경제적인 누수관리목표 달성 시 경제적인 누수저감량은 660,000 m³/년, 유수율로 환산할 경우에는 91.6 %로 나타났다. 이때의 비용은 264,914 천원, 편익은 482,126 천원, 총 편익은 217,000 천원으로 산정되었다. 그리고 장기 경제적인 누수관리목표를 달성하기 위한 전략은 다음 <Table 1>과 같이 수립 할 수 있으며, 이와 같이 누수저감방법별 투자비용을 투입한다면 목표로 하는 장기 경제적인 누수수준을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 경제적인 누수관리지표의 적용

본 연구에서는 우리나라 실정에 맞는 단기 및 장기 경제적인 누수관리지표를 제시하였으며, 본 연구의 적용대상지역에서 장기 경제적인 누수관리지표(LELI)의 적용성을 평가하였다. 그 적용결과는 다음과 같다.

먼저, 적용대상지역의 현재 연간실손실량(CARL)은 925,108 m³/년이며, 본 연구에서 개발한 장기 경제적인 누수관리목표 산정 방법을 이용하여 경제적인 누수저감량을 산정한 결과는 660,000 m³/년으로 계산되었다. 그리고 이때의 장기 경제적인 연간실손실량(LEARL)은 265,108 m³/년으로 나타났고, 장기 경제적인 누수관리지표(LELI)는 3.49로써 앞으로 경제적인 누수관리목표 달성을 위한 노력이 더 필요하다고 평가 되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 누수관리목표 산정방법을 ① 현재 누수수준 결정, ② 경제적 누수관리목표의 단계적 설정, ③ 누수저감 비용 및 편익 계산, ④ 누수저감방법별 비용/편익 분석, ⑤ 단계별 경제적 누수관리목표 산정으로 5단계로 제시하였다. 특히, 누수저감방법별 비용/편익 분석은 실험적 방법과 통계적 방법으로 구분하여 제시하였고, 통계적 방법은 다시 다변량분석

방법과 누수량 추정식에 의한 방법으로 구분하여 제시하였다. 그리고 단계별 경제적 누수관리목표가 산정되면 현재의 누수관리수준과 비교하여 경제적인 누수관리가 잘 이루어지고 있는지를 평가할 수 있는 장기 및 단기 경제적인 누수관리지표를 개발하였다.

그리고, 제시된 누수관리목표 산정 방법에 대한 현장 적용 가능성을 평가하기 위하여 S시 A구와 B구를 대상으로 관망운영단계에서의 누수관리목표와 장기 경제적인 누수관리지표를 산정하였다. 누수저감방법은 누수저감방법별 비용과 편익 산정이 용이한 노후관 교체, 누수탐사 및 복구, 수압관리 방법을 적용하고, 누수저감방법별 비용/편익 분석 방법은 데이터 확보가 비교적 용이한 누수량 추정식 방법을 적용하여 장기 경제적인 누수관리목표를 산정하였다. 그 결과 적용대상지역에 대한 장기 경제적인 누수관리목표는 유수율 91.6 %로 산정되어, 현재 유수율 75.8 %와의 차이가 매우 크게 나타났으며, 장기 경제적인 누수관리지표는 3.49로써 1보다 매우 커 향후 관망운영단계의 목표 누수수준 달성을 위해 누수저감활동이 더 많이 요구됨을 알 수 있었다.

이와 같이 본 연구에서 개발된 누수관리목표 산정 방법을 연구대상지역에 적용한 결과 경제적인 누수관리목표 및 누수관리지표 계산이 가능한 것으로 나타났으며, 향후 유수율제고사업 계획수립시 목표설정 및 누수저감 기술에 대한 효과분석에도 활용 가능할 것으로 판단된다. 다만, 정확한 상수도 관망 운영관리 데이터 수집이 가능하고 다양한 현장을 대상으로 검증이 될 수 있다면, 본 연구에서 개발된 경제적인 누수관리목표 산정 방법의 효용성은 매우 커질 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업(2016002120005)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

- Carpenter T, Lambert A.O and McKenzie R.S. 2002. Applying the IWA approach to water loss performance indicators in australia", IWA World Water Congress, IWA Publishing, Melbourne, April 2002
- Fanner V. P., J. Thornton, R. Liemberger, and R. Sturm. 2007. Evaluating Water Loss and Planning Loss Reduction Strategies. Denver, Colo.: AwwaRF and AWWA.
- Lambert A., Brown T. G., Takizawa M. and Weimer D. 1999. A review of performance indicators for real losses from water supply systems", AQUA, IWA Publishing , Vol. 48, No. 6, pp. 227-237
- Lambert A.O. and Fantozzi, M. 2005a, Recent advances in calculating economic intervention frequency for active leakage control, and implications for calculation of economic leakage levels, Water Science and Technology: Water Supply, IWA Publishing , Vol. 5, No. 6, pp. 263-271
- Lim E. J., Savic D., and Kapelan Z., 2015, Development of a Leakage Target Setting Approach for South Korea based on Economic Level of Leakage, Procedia Engineering 119, pp. 120-129
- Smout I. K., Kayaga S. M., and Muoz-Trochez C., 2007, Adapting the Economic Level of Leakage concept to include Carbon Emissions, and Application with Limited Data, Loughborough Univ
- Sustainable Water Resources Research Center, 2011, Application of protection and reduction techniques of the water leakage
- Tripartite group, 2002, Best practice principles in the economic level of leakage calculation, Ofwat
- U.K. Water Industry, 1994, Managing Leakage: Setting economic leakage targets report)