

누수탐사에 의한 유량분석 및 보수의 경제적 효과

Analysis of Flow and Economic Benefit Through Water Leakage Detection and Repair

이승철^{1,*} · 이상일²

Lee, Seung-Chul^{1,*} · Lee, Sang-II²

1 (주)대우엔지니어링 상하수도부

2 동국대학교 토목환경공학과

(2004년 9월 8일 논문 접수; 2005년 1월 24일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Field measurement data on water leakage are not readily available and it causes inaccurate assessment of water demand and poor supply planning. In this study, the procedure for leakage detection and unaccounted water calculation is proposed and applied to a city. The city has suffered from the significant amount of leak water and the financial loss as a result. Measurements were made for pressure and flow at 18 locations before and after the repair. Repair of the leakage increased pressure up to 2.0kgf/cm² and saved 17.1% of water supply from distribution reservoirs. Monetary value of annual water savings for the entire city amounts to 1 billion won. It is believed that leakage detection and data analysis conducted in this study will contribute to the change of current practice and to the establishment of better water supply management system.

Key words: leakage detection, distribution reservoir, unaccounted water

주제어: 누수탐사, 배수지, 무수수량

1. 서 론

2003년 12월 말 현재 국내의 수도 보급률은 89.4% 이상에 이르러 수도사업의 유지관리가 매우 중요한 시점에 이르렀다. 이제는 수도사업에서 도출된 문제를 해결하기 위한 방안이 모색되어야 하며, 그 중 누

수문제의 해결은 수도사업이 안고 있는 커다란 과제 중 하나이다. 2003년도 1년간 우리나라에서 생산·공급한 수돗물 총량은 5,723백만m³으로 이 가운데 누수량(781백만m³) 등을 제외한 실제 유효수량은 4,940백만m³이며, 수도요금에 부과된 양(유수수량)은 4,489백만m³(유수율은 78.4%)으로 나타났다. Fig. 1은 연도별 유수율·누수율 변화 추이를 나타낸

*Corresponding author Tel: +82-31-738-0364, FAX : +82-31-738-0701, E-mail: scllee@dweng.co.kr (Lee, S.C.)

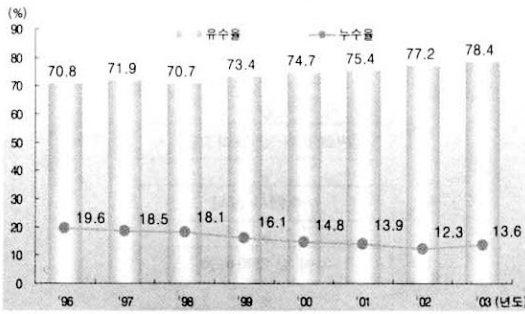


Fig. 1. 연도별 유수율·누수율 변화 주위.

것으로 '98년(18.1%) 이후 2003년(13.6%)까지 전체적인 누수율은 꾸준히 감소하고 있으나 강원도, 전라북도, 전라남도, 경상북도, 경상남도 등의 누수율은 아직도 20%대를 웃돌고 있다(환경부, 2004). 누수허용량을 어느 정도로 하느냐는 상수도 생산단가, 포장복구비, 누수방지기술, 종업원수 등으로 결정되는데 선진국의 경우 대개 누수율을 17%까지로 보는 경향이 있다(상수도시설기준, 1997).

향후 신규 수자원개발이나 시설의 운영에 상당한 경비가 소요될 전망이므로 경영적 측면에서 볼 때, 지금까지의 공급위주에서 수요관리 강화로 무엇을 전환할 필요성이 더욱더 절실하게 되었다. 따라서 수용가에 양질의 수량을 풍부하게 공급하고 관리주체의 재정적인 수익을 제고할 수 있는 방안으로 누수율을 저감시키기 위한 연구가 요구되고 있다.

현재 상수도 관로의 누수 원인에 대한 조사 및 연구실적은 미미한 실정이다. 기존의 연구를 살펴보면 국내의 경우 하성룡과 류연희(2000)는 지하시설물에 대한 데이터베이스로부터 누수에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 추출 분석하고 이를 공간적 속성과 결합하여 장래 누수 발생 확률을 예측한 바 있고, 이현동 등(2001)은 수용가 조사를 통한 유량, 수압측정 및 누수탐사 등을 실시하여 효율적인 누수관리의 의사결정을 위한 종합적인 전략을 수립하고 현장 적용성을 평가한 바 있다. 이길성과 조범준(2000)은 상수도 배수계통에서 압력과 유량자료를 이용하여 역산문제(Inverse Problem)를 풀어봄으로써 누수면적을 구하였다. 손광익 등(2001)은 송수관망에 대한 압력조절에 의한 누수저감 기법의 적용에 대한 연구를 실시하여 각 관망에 적합한 압력조절 기법을 개발하고, 이를

이용하여 누수량의 가능감소량 및 경제적 효과를 검토한 바 있다. 이승철과 이상일(2002)은 관로상의 누수에 따른 유수율을 증대시키기 위하여 누수탐지 원리 및 누수량 산정 방법에 대해 살펴보고, 실제 MP시의 배수관로에 적용하여 누수량 및 경비절감 효과를 제시한 바 있다.

외국의 경우 Stacha(1978)는 관 누수에 관한 유지보수시, 기존관의 수선비용 기대치가 관 교체 비용 기대치를 초과할 경우 관을 교체할 것을 제안하였다. Shamir와 Howard(1979)는 관의 파손이 관 매설 연한과 무관함을 연구하였고, Walski와 Pellicia(1982)는 관 크기, 온도, 기존 관 파손의 관점에서 관의 파손에 접근하였으며, Clark 등(1982)은 누수원인이 압력과 부식 침식에 의한 것임을 연구한 바 있다. 다른 접근 방식으로 Li와 Haimes(1992a, b)는 마르코프과정을 사용하여 여러 인자에 의한 주요 관로시스템의 관 파손(누수) 현상 모델을 개발하였다. Bach 등(2002)은 제한된 자금 안에서 배수관망의 누수관로에 대한 최적의 투자계획 및 교체시기 결정에 관해 연구한 바 있다. Steven와 Gayatri(2004)는 유량측정 데이터를 토대로 통계학적 접근방식을 통해 배수관망 시스템의 누수량을 예측하는 새로운 방법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 관로의 누수방지를 통한 유수율을 증대시키기 위하여 누수탐사 원리, 과정 및 누수량 산정 방법에 대해 살펴보고, 실제 YJ시의 급수구역 내 구역 고압이 가능한 IY, BG, BS, SB배수지의 4곳에 적용하여 비교유량 측정, 수압측정, 누수탐사 등을 실시하여 누수 수리 전·후의 절감량과 이에 따른 비용 절감효과를 검토하였다. 아울러 누수 수리 전후의 시간대별 급수량 현황을 살펴봄으로써 급배수 운영관리에 기여할 토대를 제공하고자 한다.

2. 누수탐사 절차

급수구역 배수량은 유효수량과 무효수량으로 구분한다. 유효수량은 유수수량(accounted water)과 무수수량(unaccounted water)으로 나뉘며 무효수량은 조정감액수량과 누수량으로 나뉜다. 유효수량이란 정수장에서 생산된 물의 총량(총생산량)에서 급·배수관에서의 누수 등으로 유실된 양을 제외한 것으로 실제로

수용가에서 쓸모있게 공급하는 쓰여진 물의 양이고, 유수수량은 유효수량 중 수돗물 사용량을 요금으로 징수할 수 있는 수량, 무수수량은 생산된 물이 유효하게 쓰여졌으나 요금으로 징수되지 않아 수입이 없는 수량, 무효수량은 요금징수시 조정에 의하여 감액 대상이 된 수량(감액수량)과 누수량을 더한 양, 누수량은 수도사용자의 계량기 이전까지 발생한 량, 즉 노후 수도관 등으로 누수(leakage)된 양을 말한다. 누수율(leakage rate)은 누수량과 연간생산량의 비를 말한다. 유수율(rate of accounted water)은 유수수량을 연간생산량으로 나누어 100분율로 나타낸 것을 말한다. 유수율을 향상시키기 위해선 누수량을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다(환경부, 2004).

누수탐사를 통해 수량공급에 지장을 주는 문제점을 발견함으로써 유수율이 낮은 원인을 찾아 유수율을 향상시키고, 누수로 인한 2차 재해를 방지함으로써 수리비용 및 동력비를 절감할 수 있다.

누수탐사는 지하에 매설된 관로를 청음 등을 통해 지상에서 확인, 이상(누수)관로를 수리하여 물의 운반을 원활히 하고, 비용이 투자된 정수, 수자원을 유효하게 이용하는 일로 정의할 수 있다. Fig. 2은 누수탐사의 흐름도이다. 우선 (1) 작업계획 및 수용가 조사는 상수도 시설현황, 현장 시설물조사 및 수용가 검침기록을 조사 분석하고 (2) 관로조사는 기존 배수관망도를 참고하여 지하매설물의 위치(관로위치, 심도)를 파악하며 (3) 지하에 매설된 관로를 야간노면 청음조사 등을 통해 누수탐사를 실시 지상에서 확인하고 (4) 유량 및 압력측정조사는 누수 수리 전·후로 분류하여 1, 2차에 걸쳐서 실시한다. (5) 실시 결과 데이터를 비교 검토하여 관로 수압의 적정여부, 누수의 크기, 절감량을 간접 비교한다.

누수구멍으로부터의 유량은 관내 압력수두의 제곱근에 비례하며 다음 식으로 계산한다. 여기서 Q 는 관내 압력수두가 $P(\text{kg/cm}^2)$ 일 때의 누수량, Q_0 는 관내 압력수두가 $P_0(\text{kg/cm}^2)$ 일 때의 누수량이다.

$$Q = \sqrt{P/P_0} \cdot Q_0 \quad (1)$$

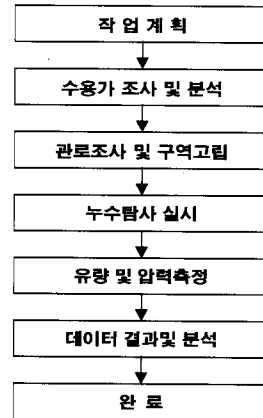


Fig. 2. 누수탐사의 흐름도.

3. 대상지역

대상지역으로는 급수구역 내 구역 고립이 가능한 YJ시 IY배수지, BG배수지(장흥면), BS배수지(광적면, 백석읍), SB배수지(양주읍, 백석읍)의 4곳에서 급수되는 배수관로를 선정하였다(Fig. 3).

2000년 12월 말 현재 구역내 인구 120,293명 중 급수인구는 72,854명이며 상수도 보급율은 60.6%로서 특·광역시 98.7%, 도시지역 97.0%, 읍지역 80.8%보다 상당히 낮음을 알 수 있다. 1인 1일 급수량은 '96(345l), '97(313l), '98(308l), '99(282l), 2000(280l)으로 역시 감소추세를 알 수 있다. 시설용량은 31,500m³/일, 급수량은 20,404m³/일로 현재 급수하는 데는 불편함이 없지만, 과거 수년간의 급수량 증가 추세와 장래 수요형태의 변화, 급수인구 증가 등을 감안하면 정확한 수요의 예측과 그에 따른 급수계획을 수립해야 할 상황이다. 한편, 유효수량은 2000년 기준 87.5%이며, 요금이 부과되는 유수율은 79.4%에 불과하여 상수도 생산량의 20.6%는 누수 등의 손실과 요금체납 등으로 매년 막대한 재정적 손실을 입고 있는 실정이다(YJ시, 2002)

Table 1은 배수지별 용량, 배수관로 관경 및 관종을 나타낸 것으로 IY와 BG배수지의 경우 1,000m³/일, SB와 BS배수지의 경우 각각 1,200, 10,000m³/일이며 유량 측정부의 관경은 300, 400, 700mm이고 관종은 DCIP(닥타일주철관)이다. 유량측정은 배수지 유출부에 설치되어 있는 삼입식 터빈 혹은 초음파식

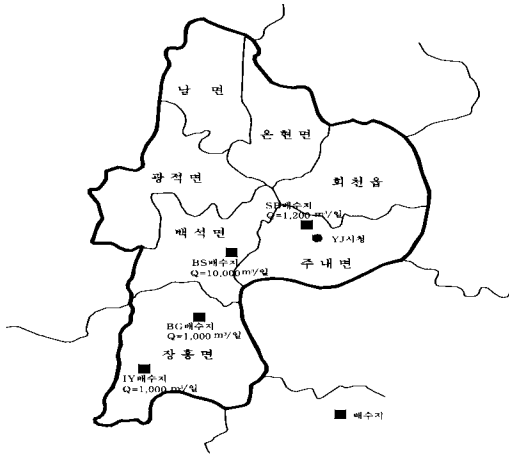


Fig. 3. YJ시의 배수지 위치도.

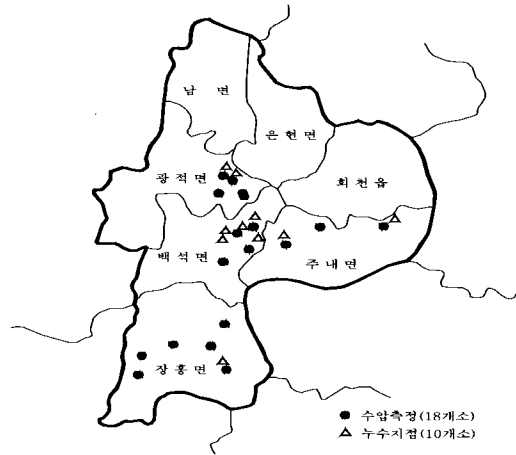


Fig. 4. YJ시의 수압 측정 및 누수발생 위치도.

다회선 유량계를 이용하여 10분 간격으로 Data를 읽도록 구성하였다. 당초 5분 간격으로 측정하였으나 차이가 없어 10분 간격으로 기준을 설정하였다. 수압 측정은 자기기록수압계 (Vernon Morris)를 이용하여 24시간 기록지에 기록되도록 하였다. 누수는 전자식 누수탐지기(HLD-7000, HG-10)인 누수검출기(Leak Hunter)를 이용하여 야간최저유량 시간대에 측정하였다.

4. 누수탐사 계측자료 분석

4.1. 수압 및 유량

Fig. 4는 YJ시의 지역별 수압 측정 및 누수발생 위치도를 나타낸 것이다. 수압계 및 유량계 설치한 장흥, 양주, 광적, 상수도 누수탐사 조사시 설치한 것으로 설치위치는 기본적으로 기존 준비된 상수도 배관망도 및 누수추정, 불량급수지역, 환경 협소지역등 기초적인 물의 흐름을 알 수 있는 지점에 설치하였다. IY, BG배수지가 위치한 장흥면의 경우 6개 지역에 수압계를 설치하였고 1개 누수 지점을 찾아냈으

며, BS, SB배수지가 위치한 광적면, 백석면, 양주읍의 경우 12개의 수압계를 설치하였고 9개의 누수지점을 찾아냈다.

Table 2는 YJ시의 지역별 수압 측정일자, 측정횟수를 나타낸 것으로 수압측정조사는 누수탐사 및 수리전후를 분류하여 1차 수압측정은 1단계 유량측정 후, 2차 수압측정은 2단계 누수수리완료 시점에 각각 실시하였다. IY배수지(2, 5번)는 조사기간 내 누수가 발견되지 않은 경우로 압력의 변화가 거의 없었던 반면, BG배수지는 누수수리시점과 인접한 3번 지역의 경우 1차 측정시 주간 2.4kgf/cm², 야간 2.8kgf/cm², 이었으나 2차 측정시에는 주간 4.4kgf/cm², 야간 4.8kgf/cm²로 수압이 상승하였다. 이는 누수수리시점인 2차 측정치의 경우가 1차 측정 때보다도 주·야간 최대 2.0kgf/cm² 높음을 의미한다. 누수수리지점과 떨어진 1, 4, 6지역의 경우에는 주야간시간대에 약 0.15kgf/cm² 정도 수압이 높아진 것으로 분석되었다. BS배수지의 광적면의 경우 5개의 지역에 수압계를 설치하여 측정된 바 수압의 변화양상이 장흥면의 경우와 거의 같음을 알 수 있다. 즉, 누수수리지점과 인

Table 1. 배수지별 용량, 관경, 관중 및 유량계 현황

배수지	용량(m ³)	관경(mm)	관 중	유량계
IY	1,000	300	D.C.I.P	삼입식 터빈
BG	1,000	300	"	삼입식 터빈
SB	1,200	400	"	초음파식 다회선
BS	10,000	700	"	초음파식 다회선

Table 2. 누수 수리 전후의 수압측정 비교

지역 (배수지)	위치 번호	1차 측정			2차 측정		
		일 자	최고(야간) (kg/cm ²)	최저(주간) (kg/cm ²)	일 자	최고(야간) (kg/cm ²)	최저(주간) (kg/cm ²)
장흥면 (IY, BG)	1	8.19~8.20	4.0	3.6	9.23~9.24	4.0	3.8
	2	8.19~8.20	4.5	4.3	9.23~9.24	4.6	4.2
	3	8.20~8.21	2.8	2.4	9.24~9.25	4.8	4.4
	4	8.20~8.21	3.2	2.8	9.24~9.25	4.8	4.4
	5	8.21~8.22	4.0	4.0	9.25~9.26	4.2	4.0
	6	8.21~8.22	6.8	6.4	9.25~9.26	6.8	6.4
광적면 (BS)	1	8.26~8.27	5.6	5.4	9.30~10.1	5.6	5.4
	2	8.26~8.27	5.6	5.2	9.30~10.1	5.6	5.2
	3	8.27~8.28	4.4	2.4	10.1~10.2	4.6	4.0
	4	8.27~8.28	5.8	5.6	10.1~10.2	5.8	5.6
	5	8.28~8.29	5.8	5.6	10.2~10.3	6.0	5.6
양주읍 및 백석읍 (SB, BS)	1	9.9~9.10	3.1	1.8	10.10~10.11	3.1	1.9
	2	9.9~9.10	5.2	4.1	10.10~10.11	5.7	4.4
	3	9.10~9.11	5.1	4.8	10.11~10.12	5.1	4.9
	4	9.10~9.11	5.4	5.2	10.11~10.12	5.2	5.0
	5	9.11~9.12	4.5	4.0	10.12~10.13	4.5	4.4
	6	9.11~9.12	4.0	3.7	10.12~10.13	4.0	3.9
	7	9.12~9.13	2.6	1.1	10.13~10.14	2.2	1.9

접한 3번 지역의 경우 1차 측정시 주간 2.4kgf/cm², 야간 4.4kgf/cm²이었으나 2차 측정시 주간 4.0kgf/cm², 야간 4.6kgf/cm²로 수압이 높아졌다. SB, BS배수지의 양주읍 및 백석읍의 경우는 7개의 지역에 수압계를 설치하였다. 이 중 누수수리지점과 인접한 백석면의 1, 2번 지역의 경우 1차 측정시 주간 1.8kgf/cm², 4.1kgf/cm², 야간 3.1kgf/cm², 5.2kgf/cm²이었으나 2차 측정시 주간 1.9kgf/cm², 4.4kgf/cm², 야간 3.1kgf/cm², 5.7kgf/cm²로 측정되었다. 양주읍의 누수수리지점인 5, 7번의 경우 평균 0.5kgf/cm² 수압이 상승함을 알 수 있다. 여기서 야간의 경우 수압측정값은 야간 최소유량시의 최대값이다.

유량측정조사는 각각의 배수지 유출부에 설치되어 있는 유량계를 이용하였다. 1단계 유량측정은 구역고립 후 시간대별 유입량을 측정하고, 2단계 유량측정은 누수탐사 및 수리를 완료후 실시하여 1단계 유량 측정 결과와 비교함으로써 절감량을 산정하였다.

Table 3은 누수 수리 전·후의 유량측정 결과치를 나타낸 것이다. 유량측정결과 IY배수지의 경우는 누수발생 위치가 없기 때문에 1, 2차 측정 일급수량이 일정함을 알 수 있다. BG, SB배수지의 경우 누수 수

리 전 일급수량이 각각 1,493m³/일, 1,908m³/일이었던 것이 누수 수리 후에는 1,143m³/일, 1,465m³/일로 350m³/일과 443m³/일의 누수량이 절감되었다. 급수량이 제일 큰 BS배수지의 경우 일급수량이 9,573m³/일이었으나, 누수 수리 후 8,030m³/일로 1,548m³/일의 누수량을 절감함을 알 수 있다. 즉 BG배수지는 급수량 중 23.4%, SB배수지는 23.2%, BS배수지는 16.1% 절감함을 알 수 있다.

4.2. 누수 수리 전·후의 시간대별 급수량

Fig. 5는 IY배수지의 시간대별급수량, Fig. 6~Fig. 8는 각 배수지의 누수 수리 전·후의 시간대별 급수량을 나타낸 것으로 유량은 10분 간격으로 24시간을 측정하였다. 주·야간 물 사용 패턴은 대체적으로 일정함을 보이고 있으며 오전 7~10시 오후 13~14시, 20시 전후에 물 사용량이 크고, 새벽 시간대인 오전 1~5시 사이에는 적음을 알 수 있다. IY배수지의 경우는 누수발생 위치가 없기때문에 시간대별 1, 2차 유량 측정값이 일정함을 알 수 있다. 반면, 누수 수리를 시행한 BG배수지는 평균 4.05l/sec, SB배수지는 평균 5.12l/sec, BS배수지는 평균 17.91l/sec로 수리

Table 3. 누수 수리 전·후의 유량변화

배수지	1차 측정 (누수 수리 전) (m ³ /일)	2차 측정 (누수 수리 후) (m ³ /일)	절감유량 (m ³ /일)	절감율 (%)
IY	663	650	-	
BG	1,493	1,143	350	23.4
SB	1,908	1,465	443	23.2
BS	9,573	8,030	1,548	16.1

전·후의 시간대별 유량이 현격한 차이를 나타내고 있다. 이는 일정 급수량에 대한 관거의 누수 수리에 따른 결과임을 알 수 있다.

4.3. 누수절감량 및 절감액

Table 4는 누수탐사에 따른 급수관망의 누수 수리 시 산출한 절감량과 생산원가를 고려한 절감액을 나타낸 것이다. 전체 YJ시의 IY배수지를 제외한 BG, SB 및 BS배수지의 누수 수리 후 절감량(누수량)은 약 2,341m³/일이며 연간으로 환산하면 854천m³/년이

다. 2000년 생산원가 1,200원/m³(YJ시, 2002)을 적용하면 BG배수지는 153백만원, SB배수지는 194백만원, BS배수지는 678백만원이 절감됨을 알 수 있다. 이는 수량으로는 4개 배수지 누수 수리 전 총급수량 (13,637m³/일) 대비 17.1%에 해당하는 양이며 경제적 측면으로는 YJ시 전체 연간 1,025백만원이 절감됨을 의미한다.

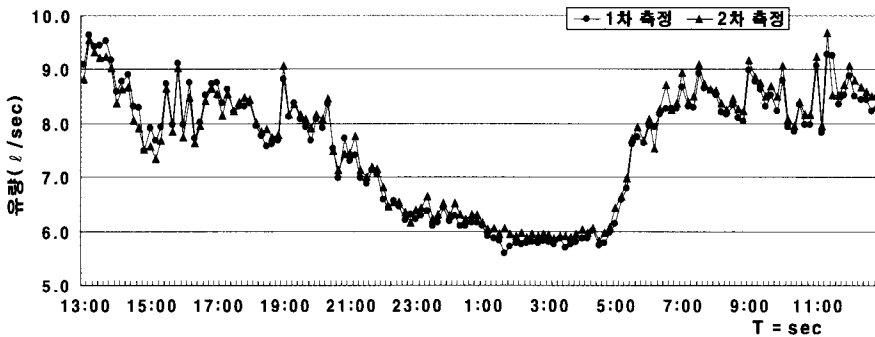


Fig. 5. IY배수지의 시간대별급수량.

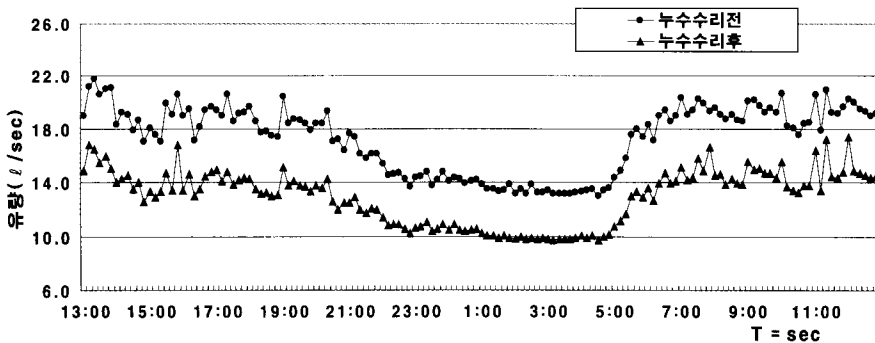


Fig. 6. BG배수지의 누수 수리 전·후의 시간대별급수량.

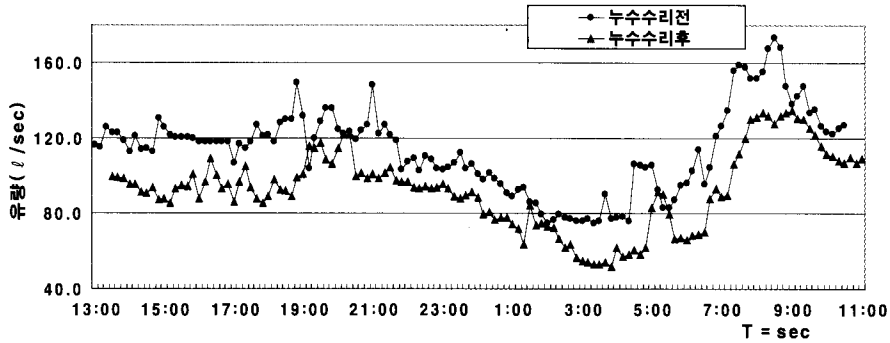


Fig. 7. BS배수지의 누수 수리 전·후의 시간대별급수량.

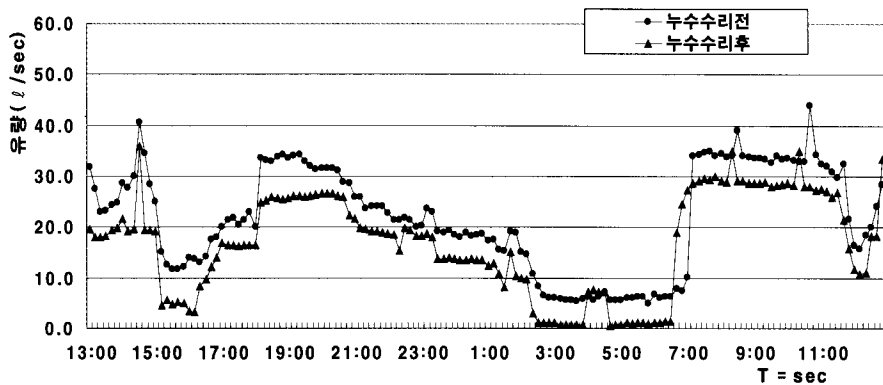


Fig. 8. SB배수지의 누수 수리 전·후의 시간대별급수량.

Table 4. 누수절감량 및 절감액 비교

배수지	절감유량(m ³ /일)	절감유량(m ³ /년)	2000년 생산원가(원/m ³)	절감금액(백만원)
BG	350	127,750		153
SB	443	161,695	1,200	194
BS	1,548	565,020		678
계	2,341	854,465		2,072

5. 결 론

현재 국내의 경우 배수시스템을 블록화하여 발생 위치별 누수량을 비교할 수 있는 실측치가 지금까지 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 관로상의 누수방지를 통한 유수율을 증대시키기 위하여 누수탐지 원리에 대해 살펴보고, 실제 YJ시의 급수구역내 구역 고립이 가능한 4개 배수지에서 수압측정, 비교유량 측정, 누수탐사 등을 실시하였다. 이를 바탕으로 누수 수리 전, 후의 누수 절감량과 이에 따른 비용 절감

효과를 살펴 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존의 누수량은 수돗물 생산량에 따른 사용량의 차로써 산정하였으나, 본 연구에서는 급수·배수 관로의 누수를 탐지하고 누수 수리 후 절감량을 산정하였다.
2. 실제 YJ시의 급수구역내 구역 고립이 가능한 구역에 적용하여 누수량 2,341m³/일(854천m³/년)을 찾아냈다. 이는 누수 수리 전 총급수량(13,637m³/일)의 17.1%에 해당하는 양이며 누수차단에 따른 경제적 효과는 연간 1,025백만원에 달하는 것으로 나타났다.

3. 누수 수리 전후의 시간대별 압력과 급수량 변화를 살펴봄으로써 급배수 운영관리에 기여할 토대를 제공하였다.

감사의 글

본 연구는 2003학년도 동국대학교 연구년 지원으로 이루어졌으며 이에 감사합니다.

참고문헌

- 손광익, 지흥기, 이순탁 (2001) 압력조절에 의한 누수절감 효과, *한국수자원학회 학술발표회*, pp. 49-52.
- 이길성, 조범준 (2000) 역산문제를 이용한 관망에서의 누수 탐지, *한국수자원학회 학술발표회*, pp. 873-878.
- 이승철, 이상일 (2002) 누수탐사에 의한 유량측정자료 분석, *대한토목학회 학술발표회*, pp. 208.
- 이현동, 김만기, 정원식, 박필재 (2001) 효율적인 누수관리를 위한 종합적인 전략 및 현장적용, *대한상하수도학회 춘계학술발표회*, pp. 49-52.
- 하성룡, 류연희 (2000) 확률적 신경망을 기반으로 한 수도관 누수예측, *대한상하수도학회 추계학술발표회*, pp. 19-22.
- 한국수자원공사(2001). http://www.kowaco.or.kr/intro/i_e/i_ed/i_edc/i_edce/watercol7-3.htm
- 환경부 (1997) 상수도시설기준, pp. 466-467.
- 환경부 (2004) 2003 상수도통계
- YJ시 (2002) 장흥, 양주, 광백급수구역 상수도누수탐사 실시용역 보고서, pp. 2-62.
- Bach, N.L., Fujiwara, O., and Luong, H.T., (2000). Optimal Fund Assignment and Allocation Models for Pipe Repair Maintenance in Leaky Water Distribution Networks, *Water Resour. Res.*, **36**(5), pp. 1315-1324.
- Clark, R.M., Stafford, C.L, and Goodrich, J.A., (1982). Water Distribution Systems: Spatial and Cost Evaluation, *J. Water Res. Plann. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, **108**(3), pp. 243-256.
- Steven G.B., and Gayatri N., (2004). Leak Estimation in Water Distribution Systems by Statistical Analysis of Flow Readings, *J. Water Res. Plng. and Mgmt.*, **130**(4), pp. 321-329
- Li, D., and Haimes, Y.Y., (1992a). Optimal Maintenance-Related Decision Marking for Deteriorating Water Distribution Systems, 1, Semi-Markovian Model for a Water Main, *Water Resour. Res.*, **28**(4), pp. 1053-1061.
- Li, D., and Haimes, Y.Y., (1992b). Optimal Maintenance-Related Decision Marking for Deteriorating Water Distribution Systems, 2, Multilevel Decomposition Approach, *Water Resour. Res.*, **28**(4), pp. 1063-1070.
- Shamir, U., and Howard, C. D. D., (1979). An Analytical Approach to Scheduling Pipe Replacement, *J. Am. Water Works Assoc.*, **71**(5), pp. 248-258.
- Stacha, J.H., (1978). Criteria for Pipeline Replacement, *J. Am. Water Works Assoc.*, **70**(5), pp. 256-258.
- Walski, T.M., and Pellicia A., (1982). Economic Analysis of Water Main Breaks *J. Am. Water Works Assoc.*, **74**(3), pp. 140-147.