

# 상수관망에서의 누수 방지 및 저감 기술



구 자 용 ▶▶▶

서울시립대학교 환경공학부 부교수  
jykoo@uos.ac.kr

## 1. 서론

근대적인 상수도시설이 도입된 이래 약 100년의 역사를 가진 한국의 상수도는 1960년대 이후 경제개발 정책에 따른 인구의 급격한 도시유입과 공업용수의 급격한 수요증가로 상수도시설의 공급이 수요를 충족시키지 못하다가 2000년대에 들어 서울시를 비롯한 대도시부터 공급이 수요를 충족시키기 시작하였다. 2006년 12월말 현재 전국 164개 지방수도사업자(특·광역시 7, 특별자치도 1, 시 77, 군 79)와 1개 광역상수도사업자로부터 전체인구의 91.3%인 약 45,303천명이 상수도를 공급받고 있으며, 특히 7개 특·광역시에서는 99.1%의 수도보급율을 나타내고 있다(환경부 상수도통계, 2007).

한편, 국내의 상수도는 현재 국제적으로는 상하수도 서비스의 산업화, 표준화 및 개방화 추세가 급속하게 진행 중에 있으며, 대내적으로는 소비자 불신, 효율성과 전문성 부족, 규모의 영세성 등 구조적·복합적 도

전과 정부와 민간의 역할과 책무에 대한 재정립이 요구되는 등 대내외적 여건이 급변하는 전환기에 있다. 이에 국가에서는(환경부 수도비전 2030, 2006) 상수도의 3대 목표인 수량의 안정적 공급, 수질의 안전성 확보, 수압의 균등성 확보라는 목표를 보다 효율적이며 경제적으로 달성 할 수 있도록 함과 동시에 대외적인 환경변화 속에서 경쟁력을 강화할 수 있도록 하기 위한 “고객이 만족하는 수도”, “효율적인 수도”, “스스로 발전하는 수도”, “환경친화적인 수도”, “글로벌 수도”의 5개 비전을 수립하고 추진전략을 수립하였다.

상수도의 3대 목표 가운데 수량관리 현황을 국내에서 수량관리 지표로서 가장 많이 사용하고 있는 유수율을 통해 살펴보면, 2006년 정수장에서 생산된 5,753백만 $m^3$ 의 수돗물 중 요금이 징수된 유수수량은 4,613백만 $m^3$ (유수율 80.2%)로 상수도의 선진국이라 할 수 있는 유럽, 미국, 일본 등에 비하여 매우 낮은 수준을 나타내고 있다. 이의 대부분은 상수관망에서의 누수에 기인한 것으로 보고되고 있다.

상수관망에서의 누수현상은 수자원의 손실일 뿐만 아니라 압력손실로 인한 추가적인 가압 설비의 필요 및 누수가 발생한 관로 주변의 토질 약화 등을 초래하여 관망의 유지관리를 어렵게 하고, 이로 인한 심각한 경제적 손실을 야기한다. 따라서 상수도관망을 경제적으로 관리하기 위해서는 반드시 효과적인 누수방지대책이 포함되어야 한다. 현재 누수율 저감을 위한 지자

표 1. 한국과 일본의 유수율(%) 비교

년도	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
일본*	73.8	77.4	79.9	82.8	85.7	87.1	88.6	88.8	89.2	89.2	89.6	89.6	-
한국**	-	-	-	-	70.7	73.4	74.7	75.4	77.2	78.4	78.4	79.3	80.2

\*일본 수도통계, 2006 \*\*환경부 상수도 통계, 2007

체의 노력은 야간최소 유량측정과 노후관 개량사업에 의해 이루어지고 있다. 그러나 이러한 사업들은 소규모 배수구역별 누수량 수지분석 및 저감기술이 도입되어 있지 않은 상태에서 시행되고 있어 그 효과가 매우 낮은 실정이다. 이것은 기본적인 배수시스템에 대한 자료관리시스템의 부재와 이에 대한 활용기술의 부재 등에 의한 것으로, 앞으로도 누수방지사업에서 근본적인 발상전환이 없이는 효율성이 매우 낮으리라는 것이 전문가들의 지적이다. 이러한 관점에서 누수저감기술의 개발과 소규모 배수구역에서의 활용기술 개발이 매우 시급한 시점이라고 판단된다.

## 2. 상수관망에서의 누수관리

상수관망에서의 누수란 일반적으로 정수장에서 생산된 물이 각 수용가에 공급되는 과정, 즉 송·배·급수시설에서 물 손실을 말하며, 다음 표 2와 같이 다양한 요인들의 복잡한 상호작용에 의해서 발생하게 된다.

표 2. 누수 발생의 요인

내적요인	외적요인
<p>관재질에 기인</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 관, 연결 부속설비의 재질 및 구조의 부적절</li> <li>• 부식에 의한 강도저하</li> <li>• 재료의 경년 열화</li> </ul>	<p>매설환경에 기인</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 교통하중</li> <li>• 누수방치에 의한 주변의 공동화</li> <li>• 지반이동</li> <li>• 관내부의 동결에 의한 파열</li> <li>• 설계와 현실적인 조건의 차이</li> <li>• 외부 응력의 과소</li> <li>• 공장폐수 등에 의한 토양오염</li> </ul>
<p>설계 및 시공기술에 기인</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 설계오류</li> <li>• 이음 등의 접합불량</li> <li>• 부적절한 매설</li> <li>• 타구조물과의 접촉</li> <li>• 방식공법의 부적합</li> <li>• 이종금속에 의한 전위차 부식</li> <li>• 매설심도의 부족</li> </ul>	
<p>관내요인에 기인</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수압, 수질(내부부식)</li> <li>• 수격압(Water Hammer)</li> <li>• 온도변화</li> </ul>	<p>타공사·재해에 기인</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 타기업 공사에 의한 외부 손상</li> <li>• 타기업 공사에 의한 매설환경의 변화</li> <li>• 지진 등의 재해에 의한 지반·도로의 변동</li> </ul>

※수도관로의 누수방지(일본수도기술연구센터, 1990)

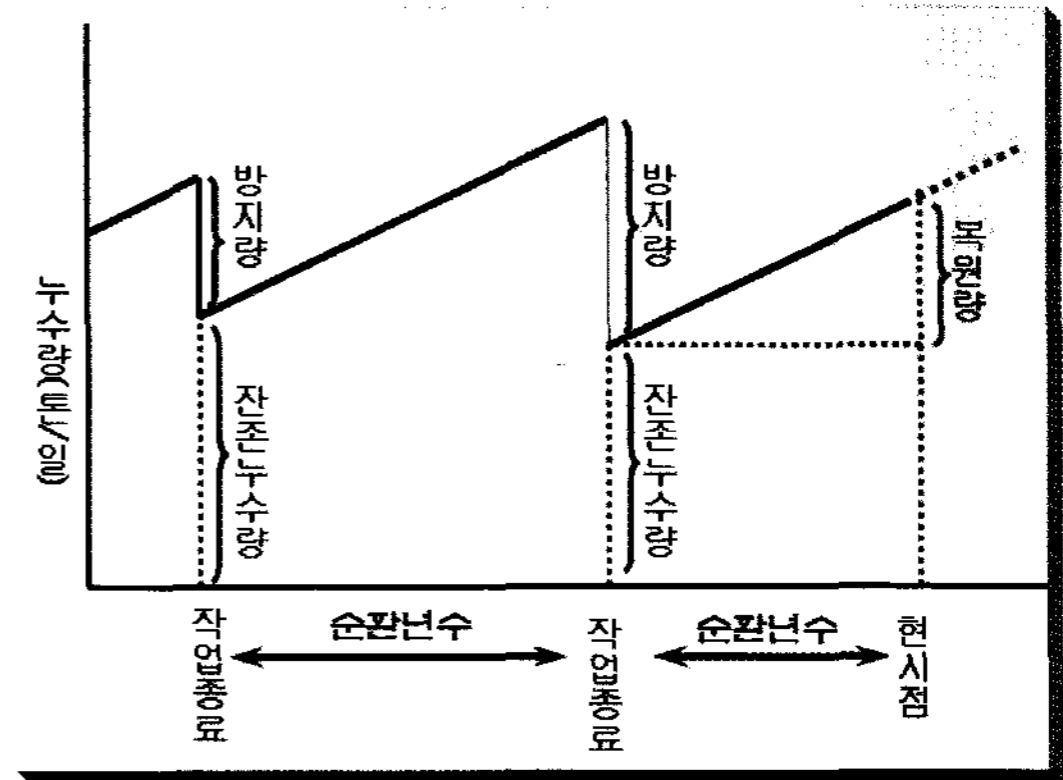


그림 1. 누수량의 복원도

이와 같이 다양한 요인들에 의해 발생한 누수는 탐지 및 조사를 통해 발견된 누수부위를 보수한다 하더라도 일정한 시간(순환년수)이 경과하게 되면 그림 1과 같이 기존의 발견되지 못한 미세한 누수부위의 성장이나 새로운 누수에 의하여 복원되는 특성을 갖고 있다.

누수방지대책의 수립은 해당 수도사업체의 급수계획, 수자원의 실태, 규모 등이 고려되어야 하는데, 표 3과 같이 크게 기초적 대책, 대증요법적 대책, 예방적

표 3. 누수방지대책

부문	항 목	시 책
기초대책	• 누수방지작업 준비	• 자원, 조직 확보 • 도면류(관망도, 구역도) • 구역설정, 계량설비의 정비
	• 실태조사	• 배수량 및 누수량 분석, 수압측정 • 누수원인의 추적, 사고기록 자료의 보존
	• 관재료 연구 및 개량, 개발	• 배수관 및 급수관의 관재질, 이음재질, 부속기기류
대중 요법적 대책	• 기동작업	• 지상누수의 즉시 수리
	• 계획작업	• 지하누수의 조기발견, 수리
예방적대책	• 수도사업계획	• 누수방지를 고려한 계획
	• 수도시설의 설계시공	• 내진성, 내구성, 내식성, 수밀성
	• 경년관 교체	• 배수관 및 급수관의 교체
	• 급수장치의 구조개선	• 도로횡단관의 집중화 • 계량기를 관민경계에 근접한 위치에 설치
	• 관로의 보호	• 방식, 곡관부의 보강
	• 잔존관 처리	• 분기점의 완벽한 처리 • 급수장치의 관리 철저
	• 관로 순찰	• 타기업 공사현장의 지도 및 감독
• 수압 조정	• 배수계통의 분할, 감압밸브 설치	

대책으로 구분할 수 있다. 이들은 동시에 추진할 필요가 있지만 장기간에 걸쳐 근본적으로 누수를 감소시키기 위해서는 예방적 대책에 비중을 두는 것이 바람직하다.

한편, 국제물학회(IWA)에서는 그동안 개발되어 사용 중인 IWA Standard Balance Method, BABE(Burst and Background Estimate), FAVAD(Fixed Area Variable Area Discharge) 등을 보조하기 위한 누수방지 및 대책의 활동을 그림 2와 같이 성공적인 누수관리를 위해 요구되는 전략들과 누수량의 관계로서 설명하고 있다. 여기서 커다란 사각형은 현재 발생하고 있는 누수량을 의미하며, 이 누수량을 잠재적으로 수압관리, 누수의 감지 및 탐지를 통한 복구시간의 단축, 적극적인 누수탐지 활동, 관종의 선택, 시공, 유지관리, 교체, 갱생 등에 의해 저감될 수 있는 누수량과 현재의 어떠한 노력으로도 완벽하게 없앨 수 없는 누수량 UARL (Unavoidable Annual Real Loss)으로 구분하여 나타내고 있다. 따라서 누수의 증가, 감소 및 현상유지는 이와 같은 4가

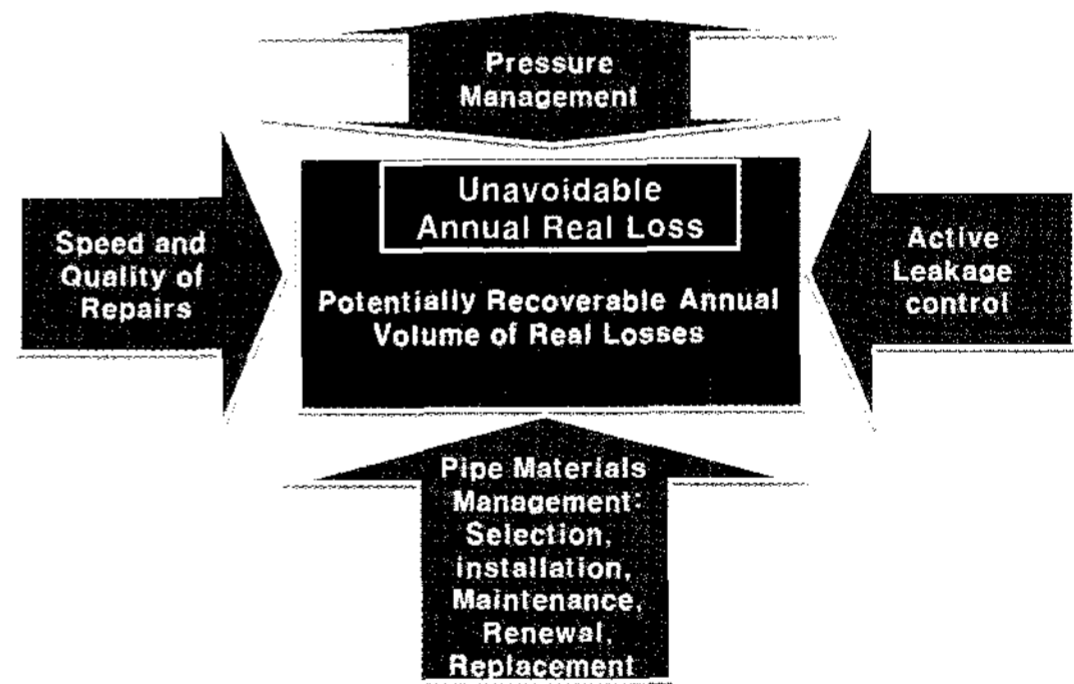


그림 2. 성공적인 누수관리를 위한 4요소 (Lambert, 2000)

지 누수 저감 및 방지노력의 수행정도에 의해 결정되며, 현재의 누수량과 UARL의 비율을 누수지수(ILI, Infrastructure Leakage Index)라 하여 얼마나 효율적으로 누수의 관리가 이루어지고 있는가를 평가하고 있다.

### 3. 누수 방지 및 저감 기술의 국내 적용 사례

그림 2에서 제시된 것과 같은 성공적인 누수관리를 위해 국내에서 적용되었거나 시범적용 중에 있는 기술들의 개략적인 설명과 그 적용사례를 소개하면 다음과 같다.

#### 3.1 누수방지를 위한 유지관리 기술 (Pipe Materials Management : Maintenance, Renewal, Replacement)

관체의 파손은 특정화시키기 매우 어려운 많은 인자들에 의해 복합적으로 발생하며 항상 그 위험이 잠재되어 있다. 누수방지를 위한 유지관리 기술이란 관 파손에 따른 누수발생의 주요 원인이 되는 관망의 상태를 평가하기 위한 것으로, 주요 영향인자인 수리적, 수질적, 시설적 측면의 인자를 고려하여 관체의 내·외면의 상태와 같은 물리적 특성과 토양 및 수질 등 매설환경을 종합적으로 분석하여 관체의 노후도, 관망의 건전도, 관로의 잔존수명을 평가하기 위한 기술이다. 대표적인 기술 분야로서는 진단장비, 보수/보강장비, 성능평가 기술로 구분할 수 있으며 각각의 국내 적용 사례를 소개하면 다음과 같다.

##### 1) 진단 및 보수/보강 장비

상수도 관망의 누수/파손 등 상태를 진단하는 가장 정확한 방법은 관체의 내·외면을 직접 진단하는 것이다. 이를 위해서는 관체를 절단하거나 연결부를 해체한 후 육안 또는 CCTV 등의 장비를 이용하여야만 진단이 가능하다.

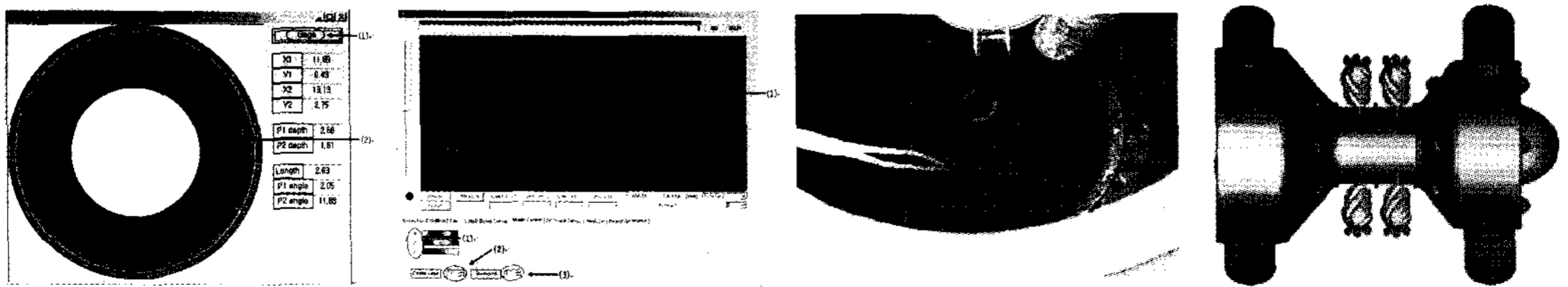


그림 3. 관망유지관리시스템-초음파 진단장비, 관내점검구, 관망진단 로봇

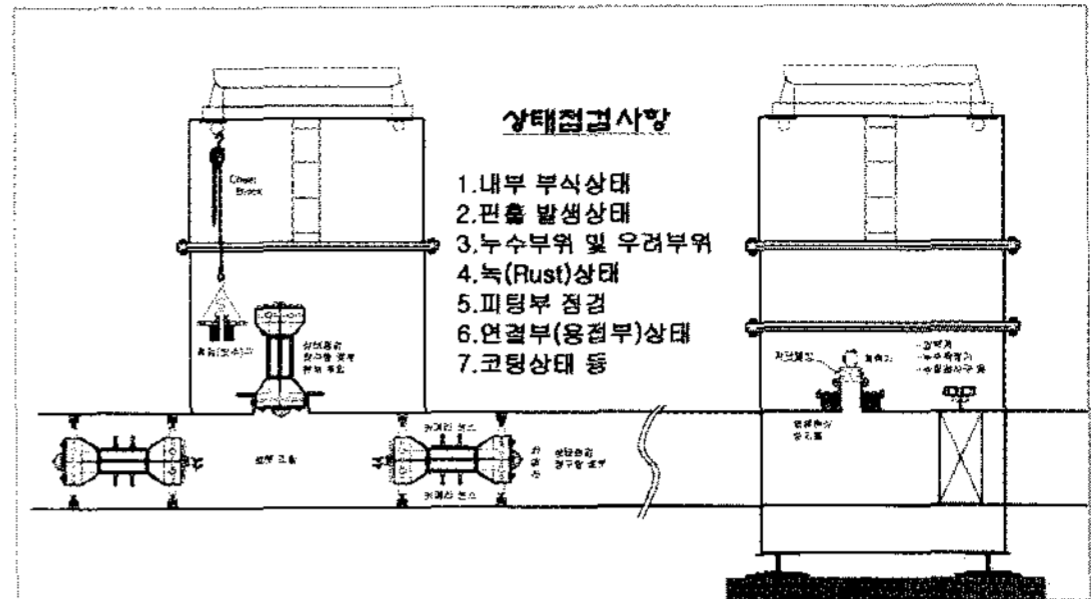


그림 4. 로봇을 이용한 관망의 유지관리 개념도

다음에서 소개될 기술은 관체에 절단이나 해체 작업 없이 관체의 직접진단이 가능하게 하기 위하여 개발된 기술로서 관내 점검구와 점검구에 적용이 가능한 CCTV, 수압계, 통합 수질센서 등을 설치한 모니터링 시스템과 진단로봇으로 구성되어 있으며 이는 정기적인 점검과 내부보수가 가능한 기술로써 S시를 비롯한 여러 현장에 시범적용 중에 있다.

그림 4는 로봇을 이용한 관망진단의 개념도로서 관내 점검구가 설치된 장소에서 점검구의 입구를 열고 점검로봇을 투입하여 관내의 동영상 및 사진을 촬영하여 작업통제차량에 전송하면, 점검결과에 따라서 녹 및 이물질 제거로봇 또는 누수보수로봇을 투입하여 보수 및 보강작업을 완료하게 하는 기술이다.

##### 2) 성능평가

상수관망정보관리 기술은 상수관망 GIS DB를 이용하여 상수관망을 최적관리 할 수 있는 방안에 대한 종합적인 시스템을 개발하기 위한 것으로서 상수관망 및 기타 관련 부속물에 대한 자료를 가치 있게 이용할 수 있게 하여 누수방지 대책 등의 수립에 과학적인 근거 자료로 사용할 수 있게 하기 위한 기술이다.

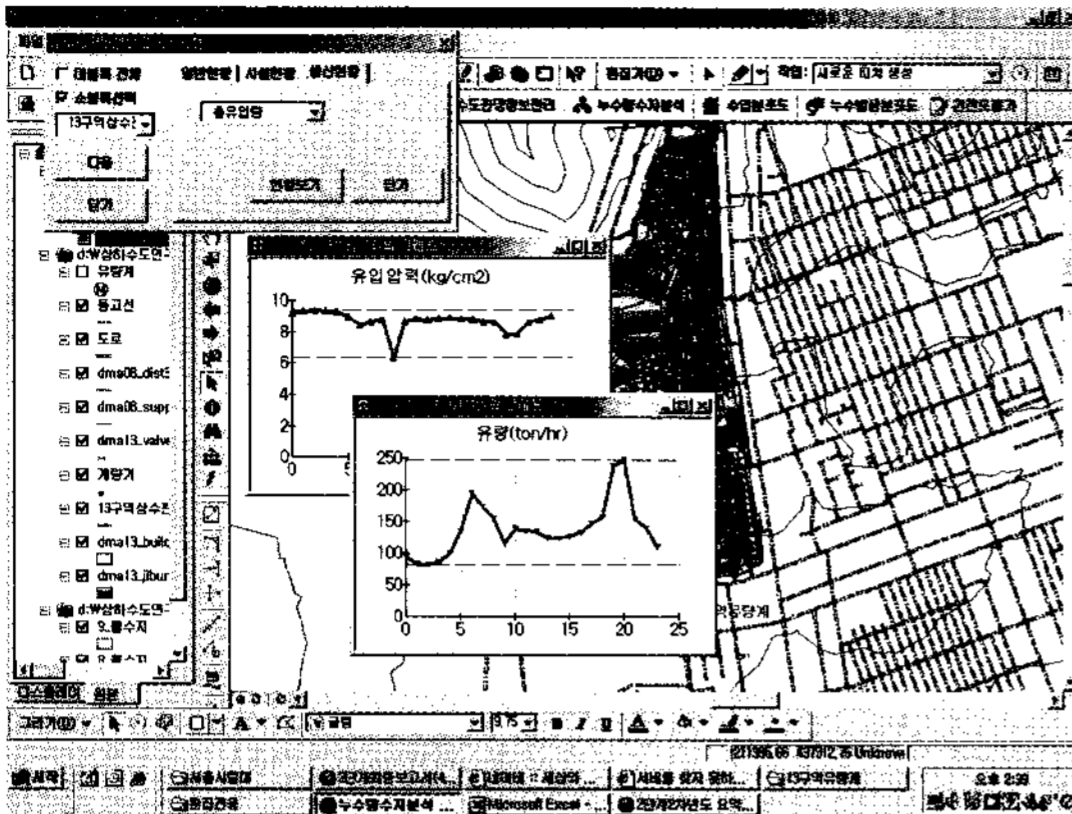


그림 5. 상수관망 정보시스템-생산현황

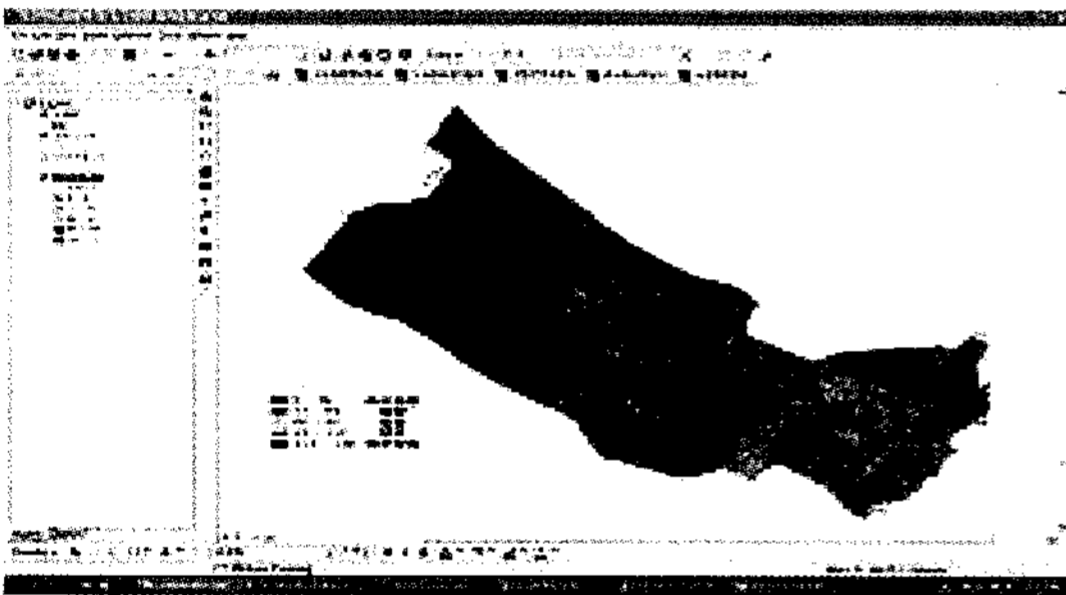


그림 6. 소블록별 관망건전도 평가

료가 충분치 못한 경우 개략적인 평가가 가능할 수 있도록 하기 위해 개발된 평가기법으로 상세한 평가에 앞서 예비평가의 성격도 갖고 있다. 반면, 관 파손확률 함수에 의한 평가방법은 많은 자료와 이론적인 배경지식이 요구되는 상세평가방법으로서 각 관로의 파손확률의 산정과 소블록별 위험도 산정을 통해 면적관리의 방향을 제시할 수 있다.

Piping Renewal 지원 및 통합관망유지관리시스템은 상수도관망의 갱생 및 교체, 관련된 비용, 설계 등을 포함한 사후 관망의 유지관리시스템을 포함한 개념으로 관망의 사후 유지관리를 위해 단순하지만 체계적이며, 경제적인 결과를 도출할 수 있는 시스템이다. 관망진단시스템과 관내 점검구를 이용한 유지관리 프로그램은 ① 코드관리(공통 코드등록, 공정등록, 공사등록) ② 점검보수 내역관리 ③ 점검보수 내역분석 ④ 운영자 관리의 4분야로 구분되어 있다. 본 프로그램을 적용하면 관망 유지관리를 위한 관내점검구의 설치 및 보수 등의 사전·사후 관리를 매우 효과적으로 수행할 수 있다.

### 3.2. 적극적인 누수관리 기술 (Active Leakage Control)

상수관망에서 적극적인 누수관리라 함은 눈에 보이지 않는 누수를 고도로 훈련된 기술자들에 의해 정확한 위치를 찾아내고 숙련공에 의해 신속히 보수하는 것을 말한다. 기존에는 누수가 발생하는 소음을 청음함으로서 누수의 위치를 추적하는 방법이 주를 이루어 왔다. 본 절에서는 누수의 청음이외에 적극적인 누수관리를 위하여 국내에서 개발되어 적용 중에 있는 부식진단 기술과 TDR기술을 이용한 누수관리 기술을 소개하고자 한다.

#### 1) 부식 진단 및 방지 기술

상수관의 부식진단 및 부식방지기술은 전기화학적인 갈바닉 부식에 근거하여 배관의 교체시기 및 잔여수명을 예측하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 국내

누수사고 분석기술은 누수사고에 관한 데이터를 집계, 관리, 정리하여 분석함으로써 누수방지 대책 또는 배수관의 관로갱신 대상선정을 위한 판단 자료로 사용하여 배수블록별 누수사고의 이력자료를 종합적으로 분석하기위한 기술이다.

배수량 수지분석 기술은 기존의 유수율이 아닌 블록별 물수지에 대한 구성요소의 명확한 정의와 계산을 통한 과학적인 누수량 분석과 누수발생이 큰 부분을 판정, 블록별 누수저감 계획을 수립하는데 있어 방향을 제시하기 위한 기술이다.

배수관망 건전도 평가 기술은 배수블록 단위로 관망의 노후도를 체계적으로 분석하고 관리하여 효율적인 관로 관리 및 갱생을 시행하는데 기여하기 위한 기술로서 성능지표를 활용한 일반평가 방법과 관파손 확률에 의한 전문평가 방법의 2가지 방법이 있다. 성능지표를 이용한 평가는 수도사업자가 보유하고 있는 자

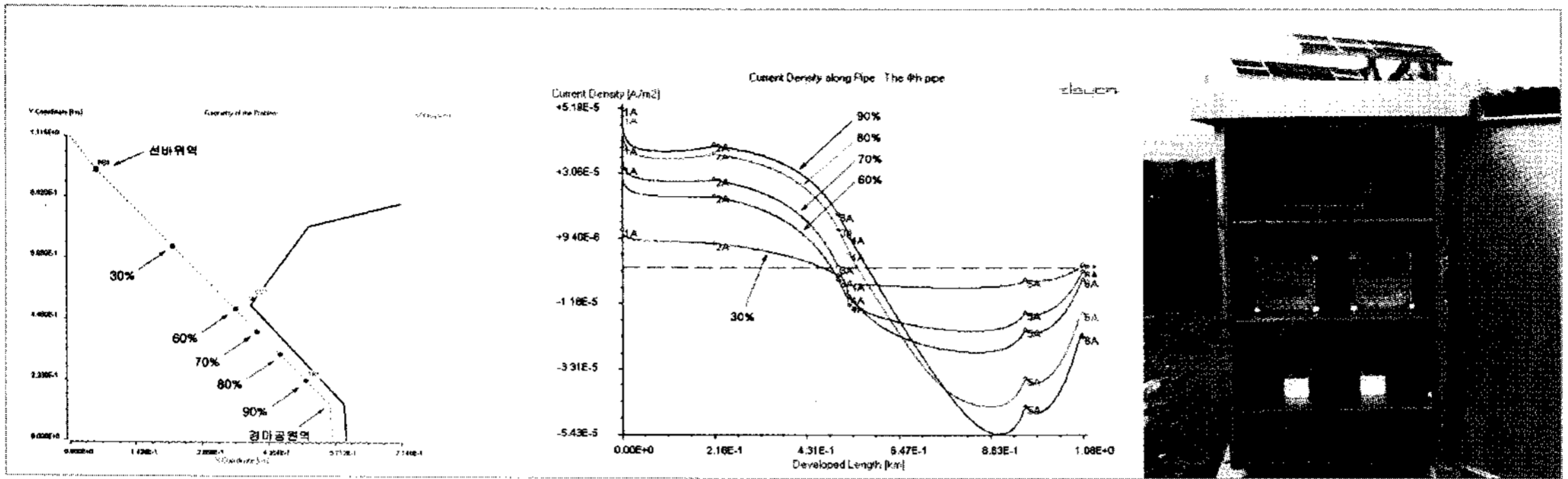


그림 7. 방식능 평가를 위한 시뮬레이션 결과와 부식측정 장치

실정에 맞는 음극방식 설계요소를 결정함으로써 효율적이고 경제적인 부식방지를 위한 최적의 음극방식 설계로 상수도 관망의 부식으로 인한 조기파손을 사전에 예방하고 누수를 최소화하여 관로교체에 소요되는 예산을 절감하기 위한 기술이다. 최근 전기시설물에서 발생하는 미주전류의 간섭에 의한 전식의 영향이 부식 제어에 있어 큰 문제점으로 부각됨에 그 중요성이 더욱 높아지고 있다.

본 기술은 방식상태 및 미주전류 간섭에 의한 전식의 영향을 그림 7과 같이 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가하고, 현장 측정 데이터를 분석하여 방식상태에 영향을 미치는 환경적인 인자들과 IR-drop의 관계를 규명하여 효율적인 음극방식 모니터링을 위한 방법을 도출하고, 토양비저항, 외부코팅의 특성(저항, 결합율), 방식 소요전류밀도의 유기적인 관계에 따른 방식 전위, 방식전류, 코팅저항의 변화를 정량적으로 분석하여 표준화된 설계방법을 통해 초보자도 쉽게 접근할 수 있도록 음극방식 설계에 대한 기준을 도출하여 이를 기반으로 음극방식의 효율 및 신뢰성을 최대화시킨 음극방식 설계 기술과 부식감지센서를 이용하여 센서에서 유기되는 전류와 배관의 방식전위 및 부식속도와 의 상관관계 규명을 통하여 배관의 방식상태 및 부식을 감지하기 위한 기술이다. 현재 A시와 K시 2개 현장에서 현장적용연구가 진행 중에 있다.

## 2) TDR 기술을 이용한 누수탐지 기술

TDR 기술을 이용한 상수도 관망의 누수탐지 시스

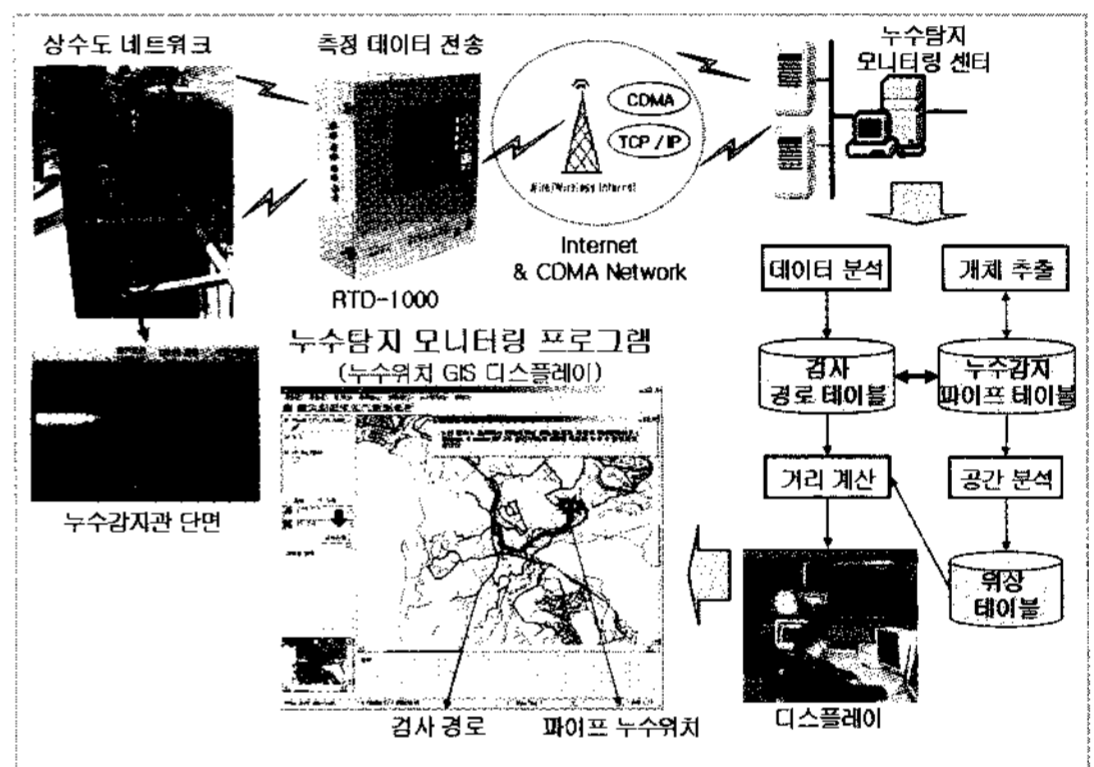


그림 8. 누수감지 모니터링 시스템 개요

템은 누수감지관, 누수감지 센서, 파이프 연결조인트, 누수감지 전용 TDR 등으로 구성된 누수탐지모니터링 시스템 등을 이용하여 누수가 발생한 때를 알려주고, 파손된 관로와 정확한 파손위치를 쉽게 파악할 수 있게 함으로서, 보수 및 교체 등의 대책을 조기에 세울 수 있도록 하여 누수로 인한 수자원의 손실을 최소화시킬 수 있는 기술이다. 특히 상수도 관망은 지역적으로 범위가 넓고 매우 복잡하게 구성되어 있기 때문에 관리에 많은 어려움이 있으나, 본 기술은 상대적으로 소수의 관리자에 의해서 상수도관망의 효율적인 유지관리가 가능하다.

다음 그림 6은 누수탐지 모니터링시스템의 구성도로서 관체의 파손에 의한 누수감지를 위한 누수감지관과 이음부의 누수감지를 위한 누수감지센서에 삽입되어 있는 도선이 누수로 인하여 끊어지는 경우 누수감지전용 TDR(RTD-1000)에 의해서 누수신호가 감지



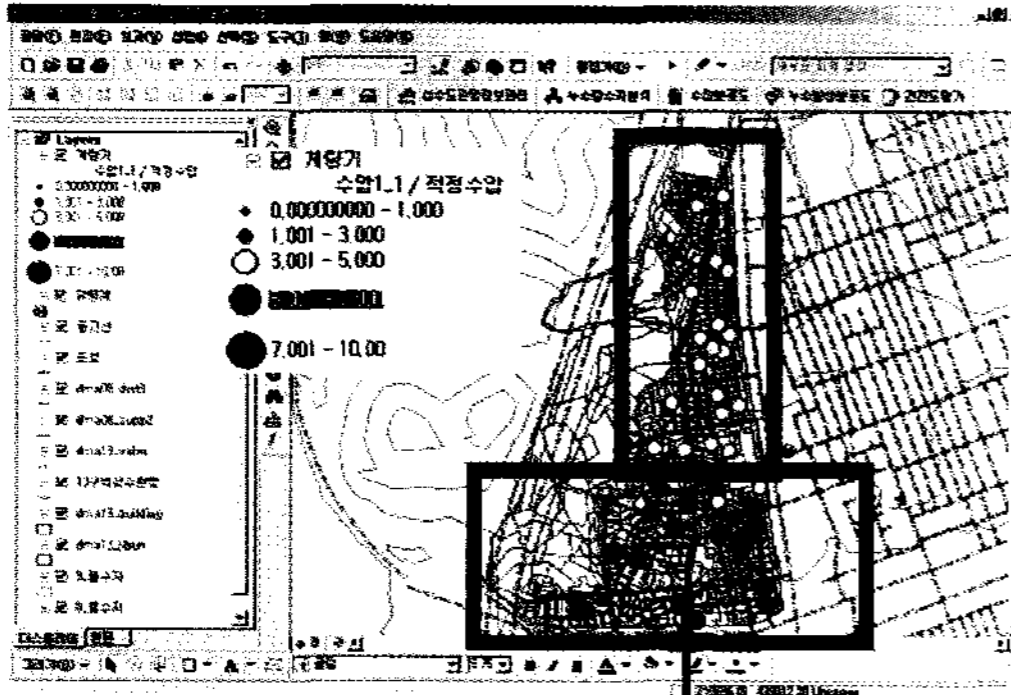


그림 9. 수압 분포도 프로그램

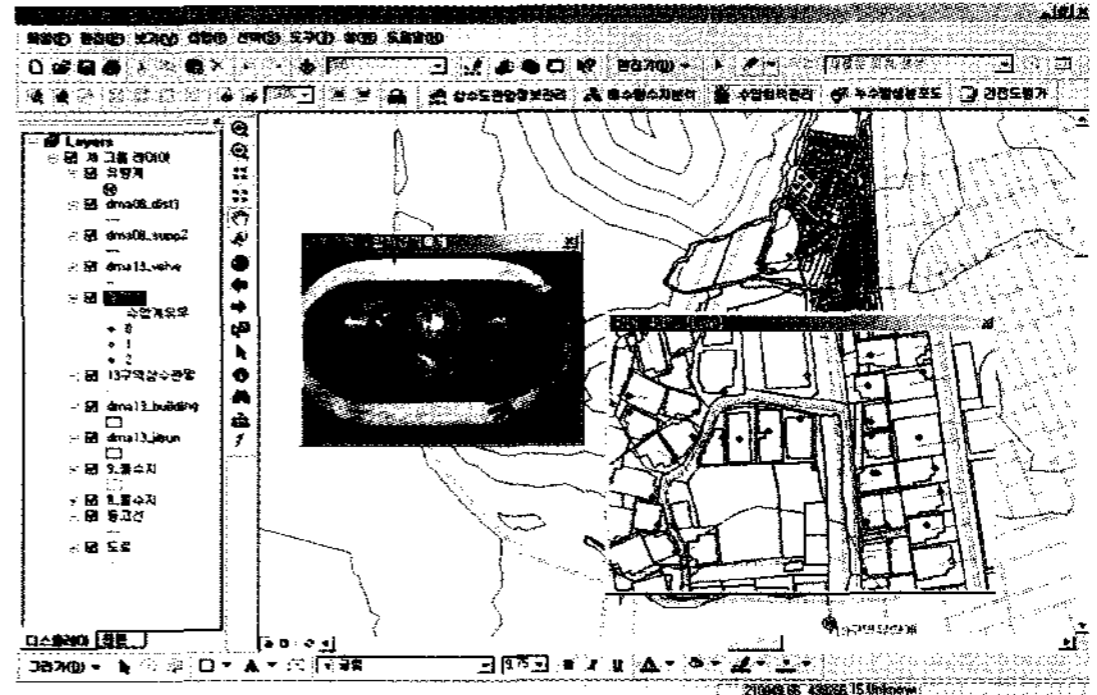


그림 10. 수압 최적화 프로그램

되고, 이것은 인터넷 또는 CDMA를 통해 모니터링 센터로 전송되어 공간분석을 통한 정확한 누수사고지점의 위치가 상수도 GIS상에 정보로 나타나게 됨으로서 신속한 누수보수작업이 가능하게 된다.

본 연구의 효율성 입증 및 시공 가능성을 타진하기 위한 시범현장적용연구로서 T시 1지역에서 관경 700mm의 2.8km 공사구간과 P시 2지역에서 관경 400mm의 2.4km 공사구간, 관경 200~400mm의 3.2km 공사구간에 시범시공을 하였으며 현재 온/오프라인 누수탐지 모니터링 시스템을 구축하여 운영 중에 있다.

### 3) 수압관리 기술

상수관의 균열부나 연결부에서 새어나가는 누수량은 수압에 비례하여 발생하게 되므로 상수관망의 누수저감을 위해 수압관리는 매우 중요하다. 수압관리에 따른 누수저감은 주로 물사용이 적은 새벽시간대에 발생하는 필요이상의 과잉수압을 제어함으로써 물 손실을 최소화한다는 방법이다. 과잉수압은 누수량을 증가시킬 뿐만 아니라 관 파손의 위험을 높이는 주요 원인이기도 하다. 수압관리를 통한 누수저감방법은 관로를 직접 건드리는 일 없이 누수량의 저감이 가능함과 동시에, 수압에 의한 관로에의 부담을 감소시켜, 새로운 누수의 발생을 억제하는 효과도 기대할 수 있는 방법이다.

국내의 S시에서 적용되고 있는 수압관리 기술을 살펴보면, 주요 기능으로는 직결급수 가능여부의 검토,

감압밸브 적용 시뮬레이션에 의한 시스템 개량효과 분석, 등수압선도 작성 등의 기능이 있다. 감압전 유입유량이 3341.5m<sup>3</sup>/day인 1개 소블록에서의 개량효과 분석결과 감압 후의 유입유량은 3036.2m<sup>3</sup>/day으로 305.2m<sup>3</sup>/day의 유입유량이 감소되었다. 이것은 연간으로 환산시 약 111,413m<sup>3</sup>/yr와 같으며 수돗물 생산원가로 환산시 약 8천만원에 해당한다.

## 4. 결론

국내의 누수 방지 및 저감 기술의 개발 및 적용 실정을 일본, 유럽, 미국 등의 기술선진국과 비교해 보면, 각 세부기술별로 많게는 10년에서 적게는 5년 정도의 격차를 나타내고 있다. 단편적이긴 하지만, 그 예로 현재까지 국내의 상수도 생산량분석과 상수도 누수에 대한 평가지표로서 널리 사용되고 있는 유수율을 상수도 선진국이라 할 수 있는 일본과 비교해 보면, 2005년 말 현재 국내의 유수율은 79.3%<sup>1</sup>로써 일본의 1996년 79.9%에 상응하는 수준으로 약 9년의 기술격차가 있다고 판단할 수 있다.

이러한 차이가 나타나는 이유는 공급에 치우친 수자원 정책에 의해 상대적으로 시설 및 수요 측면의 관리가 이루어지지 않았기 때문이며, 관련 기반기술의 사용자가 정부나 지방자치단체로 자유경쟁에 의한 시장경제원리가 통용되지 않아 관련 산업체의 자발적인 기술개발 의욕이 부족하며 또한 정부에 의한 기반기술

개발을 위한 종합적인 연구지원이 이루어지지 않았기 때문이다. 특히, 상수도관망은 정부에서 관리하는 시스템으로 관련 자료의 수집이 어렵고 연구자들의 접근이 어려워 문제점을 정확하게 파악할 수 없었다. 또한 상수도 관망시스템은 지형적, 환경적 특성이 매우 상이하여 지자체가 적극적으로 연구에 참여하여 현장을 바탕으로 하는 연구가 이루어지지 않는다면 관련 기반 기술의 발전은 이루어지지 않을 것으로 판단된다.

한편, 국제 물 시장 현황은 2003년을 기준으로 세계 상수도시장의 규모가 349.6조원이며, 그 중 국내 상수도 시장은 5.14조원에 달하고 있다(환경부 물 산업 육성방안, 2005). 또한 세계 인구의 10%가 민간 기업에 의해 상하수도 서비스를 제공받고 있으며, 2015년에는 17%까지 성장할 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 전체 상하수도 서비스시장 중 81.5%를 세계 10대 물 기업이 점유하고 있으며, 이러한 현상은 상수도시장이 사업자의 민영화 및 광역화 그리고 소수 다국적 물 전문기업에 의한 집중화 현상이 발생하고 있기 때문이라 할 수 있다. 국내 시장의 경우 국제표준화 기구(ISO/TC 224)에 의해 2007년 11월 상하수도 서비스의 국제 표준화가 시행됨으로서 국내·외 사업자 간 서비스 품질에 대한 상호비교가 가능하게 되어 향후 수도시장 개방촉진 및 외국기업의 국내시장 진입, 서비스 수준의 공개와 투명화로 소비자로부터 더욱 질 높은 서비스제공의 압력으로 작용할 것이다.

상수도 시설운영 및 유지관리 측면에서 신뢰성과 수준 높은 상수도시스템의 구축과 최적화된 운영이 상수도사업의 세계적인 흐름으로서, 본 개발기술과 같은 독자적인 국내기술의 개발이 시급하다고 할 수 있다.

## 참고문헌

1. 환경부, “2006 상수도통계”, (2007).
2. 환경부, “수도비전 2030”, (2006).
3. 환경부, “물산업육성방안”, (2006).
4. 일본 수도협회(JWWA), “2005 일본수도통계”, (2006).
5. 일본 수도관로기술센터(JPRC), “수도관로의 누수 방지”, (1990).
6. Lambert, A., Huntington, D., and Brown, T. G., “Water Loss Management in North America: Just How Good Is It? paper presented to Workshop on Progressive Development in Leakage and Water Loss Management, AWWA Distribution System Symposium, New Orleans, La., September 2000.
7. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, “누수 방지 및 저감 시스템(3단계 1차년도 연구보고서 : 2004.3~2008.3),” (2008). ☞