

## 라이프라인의 Smart-Pipe 시스템 도입을 위한 이익정량화 방안

## A Methodology to Quantifying Benefit for Implementing Smart-Pipe to Lifeline Systems

전환돈\* · 김중훈\*\* · 조문수\*\*\* · 백천우\*\*\*\* · 유도근\*\*\*\*\*

Jun, Hwan Don · Kim, Joong Hoon · Cho, Moon Soo · Baek, Chun Woo · Yoo, Do Guen

## Abstract

As the water distribution system which is one of the critical lifeline system is deteriorated and pipe failures occur frequently, the more efficient pipe monitoring system becomes a critical issue in the water industry. One of the pipe monitoring systems is called "Smart-pipe System" which is permanent, comprehensive and an automated SIM (Structural Integrity Monitoring) system and has superiorities to existing monitoring system. To implement a smart-pipe system on a water distribution system, assessment of its indirect benefit obtaining from smart-pipe such as the ratio of preventing water main failures must be preceded. However, only some researches on this field have been performed. In this paper, the concept of smart-pipe system is compared with the current monitoring systems for a water distribution system, and a method to quantify its benefit using the inconvenient time for customers is suggested. The suggested method was applied to a real water distribution system to estimate its applicability and benefit.

**Key words** : Monitoring System, Smart-Pipe, Quantifying Benefits, Water Distribution System

## 요 지

상수관망의 노후화에 따른 잦은 파괴로 인해 보다 효율적인 상수관망 모니터링시스템 구축이 중요한 문제가 되었다. 상수관망의 모니터링 시스템의 하나인 "Smart-Pipe 시스템"은 영구적이며 포괄적인 자동화된 형태의 SIM 시스템으로 기존의 모니터링 시스템에 비해 많은 장점을 가지고 있다. Smart-pipe를 도입하기 위해서는 상수관 파괴를 미리 예측하여 갑작스러운 상수관 파괴를 막는 것과 같이 smart-pipe 설치를 통해 발생하는 간접적 이익의 정량화가 우선되어야 한다. 그러나 이와 관련된 연구는 국내외적으로 매우 미비한 실정이다. 본 연구에서는 smart-pipe의 개념을 기존 상수관 모니터링 시스템과 비교하였으며 smart-pipe 설치에 따른 이익을 수용가불편시간으로 정량화하는 방안을 제시하였다. 제안된 방법을 고양시의 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였으며, smart-pipe시스템의 도입을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

**핵심용어** : 모니터링 시스템, Smart-Pipe, 이익정량화, 상수관망

## 1. 서 론

상수도는 국민의 생산과 소비를 위해 필수불가결한 요소로 산업화와 도시화와 함께 양적으로 증가하고 있다. 현재 국민의 90%가량이 상수도에 의해 용수를 공급 받고 있으며, 국내에 매설되어 사용되고 있는 상수도의 총연장은 124,468 km에 달하고 있다(환경부, 2004). 그러나 이 중 50% 이상이 매설된 지 10년이 넘는 노후관들로 급작스런 파괴 발생 시에 교통지체나 수용가의 민원 등과 같은 많은 문제들을 발생시킬 수 있다(김응석 등, 2002, 환경부, 2004). 따라서 관망의 유지 관리에 대한 중요성이 점차 증가하고 있으나, 상수관이 대부분이 지중매설이기 때문에 유지관리가 쉽지 않은 현실이

다(김응석 등, 2002).

상수관 파괴, 누수와 같은 상수관망의 문제를 탐지하기 위한 상수관 모니터링에 대한 연구는 많이 수행되어 왔다. 대표적인 방법으로 개착하여 관의 상태를 직접 확인하는 방법, 초음파를 이용한 비파괴방법 등의 기술이 개발되어 사용 중이다. 그러나 이들 기술은 비용이 과다하고 탐지효율 측면과 다양한 상수관의 조건을 탐지하는 측면에서 효율성이 떨어진 다. 따라서 이들 방법의 적용은 제한적이며 관의 파괴의 대부분은 주민 신고에 의해 인지되고 있는 실정이다. 이와 같은 문제를 해결하고 더 나아가 합리적인 교체시기의 기준으로 사용할 수 있는 smart-pipe 시스템에 대한 연구가 시작되었다.

일부 특정 지점에 설치된 계측기로부터 계측대상의 정보를

\*정회원 · 한밭대학교 토목환경도시공학부 토목공학전공 전임강사(E-mail:hwjun70@hanbat.ac.kr)

\*\*정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 교수

\*\*\*대림산업(주) 토목사업본부 사원

\*\*\*\*정회원 · 고려대학교 공과대학 연구교수

\*\*\*\*\*고려대학교 건축 · 사회환경공학과 석사과정

획득하는 기존의 모니터링 시스템과는 달리, smart-pipe 시스템은 관거 자체에 계측기가 포함되어 있어 매설된 관거 전체를 모니터링 하는 시스템이다. 최초 smart-pipe의 개념은 U.S NETL (National Energy Technology Laboratory) 및 U.S DOE (Department of Energy)에 의해 송유관과 가스관에 적용하여 도입되었다. Smart-pipe에 대한 학술적 연구는 smart-pipe 시스템의 개념에 대하여 소개한 Pendlebury (2001)의 연구가 최초이며, Dingus 등 (2002)은 지중 매설된 관의 노후도 평가를 위해 초음파와 전류흐름을 이용하는 방법을 제시하였다. 국내에서는 조규덕 (2004)이 열배관 보온재의 절연저항 변화 측정을 이용하여 지중 매설된 배관을 감시하는 기법을 소개하였다. 그리고 강병모와 홍인식 (2004)은 GIS상에서 TDR을 사용한 누수감지관과 모니터링 시스템에 관한 연구를 하였다. 또한 smart-pipe를 상수관망에 적용하기 위해 U.S EPA (Environmental Protection Agency)는 U.S Department of Defense and the National Institute of Standard and Technology, U.S Department Transportation 및 The National Science Foundation 등의 기관과 함께 연구를 수행 중에 있으며, 국내에서는 열배관에 적용을 위한 연구가 한국지역 난방공사에 의해 수행 중이다 (조규덕, 2004).

Smart-pipe 자체를 개발하는 것도 중요하지만, smart-pipe 시스템의 도입에 따른 간접이익(indirect benefit)의 산정은 smart-pipe 시스템의 구축을 위해 필수적인 요소이다. 즉 상수관의 조건을 실시간으로 모니터링 하여 관과피를 미연에 방지하고 도시지역의 갑작스런 단수에 따른 사회적 경제적 손실을 최소화하는 것과 같이 smart-pipe 시스템 도입에 따른 간접이익을 정량화하고 이를 바탕으로 투자비용과 대비하여 smart-pipe 시스템 도입을 결정할 수 있는 근거를 마련하는 것이 smart-pipe 시스템의 도입을 확대할 수 있는 중요한 조건이라고 할 수 있다. 그러나 지금까지의 연구는 smart-pipe 자체의 기술적 측면에 한정되어 있으며, smart-pipe 시스템을 적용하여 얻어질 수 있는 이익을 산정하는 기법과 같은 기술적 측면이외의 연구는 매우 제한적이었다.

본 연구에서는 이를 위해서 smart-pipe 시스템의 개념을 소개하고 현 상수도 유지관리 시스템과 비교하였다. 또한 smart-pipe 시스템을 적용하였을 때 발생하는 이익을 산정하기 위해 수용가불편시간의 개념을 제안하여 smart-pipe 시스템 도입에 따른 이익 정량화 기법을 제시하였다. 또한 제안

된 방법을 고양시 배수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다.

## 2. Smart-Pipe 시스템

### 2.1 Smart-Pipe의 정의

SIM(Structural Integrity Monitoring) system은 교량이나 건물 등 중요 시설물에 모니터링 시스템을 구축하여 대상 시설물의 안전성을 확보하는 기술로 EPA(2005)는 SIM system을 상수도 유지관리 시스템에 적용하였다. EPA (2005)가 제시하는 4가지의 SIM system 중, 상수관망의 실시간 모니터링 시스템을 구축한 것을 intelligent system이라고 한다. Intelligence system은 영구적이고 통합적이며 자동화된 시스템으로 상수관의 모니터링이 필요한 부분에 센서를 부착하고 센서로부터 데이터를 전송 받아 분석하는 능력을 갖고 있다. Intelligent system에서 관의 상태를 실시간으로 모니터링하기 위해 도입된 개념이 smart-pipe이다. Smart-pipe는 관의 상태를 모니터링할 수 있는 센서가 연속적으로 부착되어 있으며, 센서에 의해 모니터링된 결과를 중앙 시스템에 보내준다. Smart-pipe의 감지능력(sensing ability)은 모니터링을 원하는 관망의 공간적, 시간적 특성과 파괴 양상에 따라 부착하는 센서를 달리 함으로써 변화시킬 수 있다 (EPA, 2005). 예를 들어 관거가 매설된 지역이 온도에 의한 영향을 많이 받는 곳의 경우 온도를 감지할 수 있는 센서를 부착하여 온도에 의한 노후도 정도를 파악하기 위한 자료를 획득한다. 주위의 흙이 부식성이 강한 곳은 관벽이 얇아지는 것을 감지할 수 있는 센서를 부착하여 관벽의 부식 정도를 나타내는 자료를 수집한다. 또는 교통량이 많아 교통하중이 지속적으로 가해지는 경우 이로 인한 관의 변형이나 이탈 감지가 가능한 센서를 부착하여 관의 피로 정도를 파악할 수 있다. 또한 관의 안정성에 영향을 미치는 인자가 여러 가지라면 각각의 인자에 해당하는 센서를 층(layer)으로 형성하여 부착하면 원하는 관상태를 나타내는 자료를 수집할 수 있다. Smart-pipe로부터 실시간으로 수집되는 자료를 축적하여 분석함으로써 합리적인 교체나 갱생의 시기를 제시할 수 있다. 그림 1은 연속된 층을 이루어 센서가 부착된 smart-pipe의 구조를 나타내고 있다. 그림 1의 (a)는 Snite사에서 개발 중인 smart-pipe의 구조이며, (b)는 INEEL(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory)에서 연구하고 있는 smart-pipe의 구조이다.

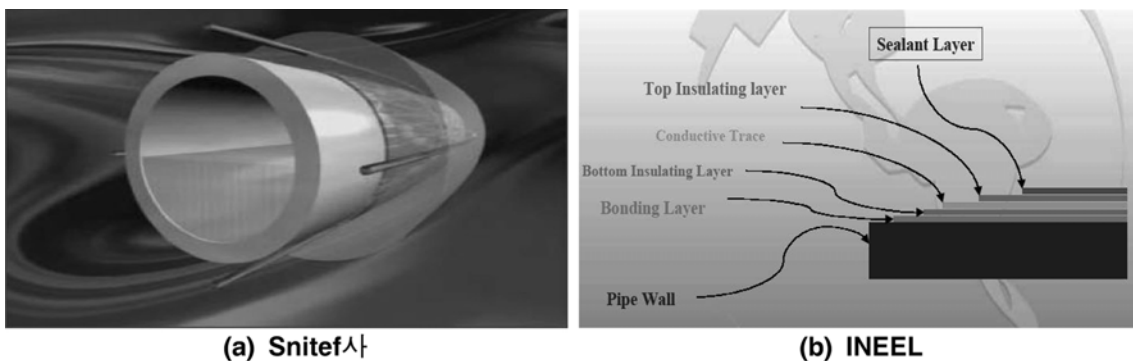


그림 1. Smart-pipe 모식도

## 2.2 Smart-pipe 시스템의 장·단점

Smart-pipe 시스템은 현재 상수도 유지관리 시스템에 비해 많은 장점을 가지고 있다. Smart-pipe 시스템을 이용해 획득된 데이터 분석을 통해 합리적인 교체나 갱생 시기의 제시가 가능하며, 관거 계량계획 수립의 기준으로 사용할 수 있다. 이는 교체나 갱생의 우선순위를 결정할 수 있고 공사 시간대를 결정할 수 있다는 것을 의미한다. 교체나 갱생의 우선순위와 공사 시간대를 미리 결정함으로써 단수에 의한 수용가의 불편시간 최소화 가능하다. 그리고 관과관을 미리 감지하지 못한 경우에도 연속적으로 설치된 센서에 의해 파괴가 일어난 정확한 위치 파악이 용이하여 현 상수도 유지관리 시스템에 비하여 관과관에 의한 단수 시간을 크게 줄일 수 있다. 그러나 smart-pipe 시스템은 초기 구축비용이 높고 시공 사례가 많지 않은 것과 같은 몇 가지 단점을 갖고 있다. 표 1은 일반적인 상수관으로 구성된 시스템과 smart-pipe를 이용해 구성된 시스템을 비교해 나타나 있다.

## 2.3 Smart-pipe 시스템의 이익 정량화 : 수용가불편시간

Smart-pipe 시스템 적용 시에 발생하는 이익은 다양한 기법에 의해 산정이 가능하며, 대표적인 기법으로 생애주기비용 분석(life-cycle cost analysis), 사용자비용분석(road-user-cost analysis) 및 지역 경제적 손실비용 분석이 있다. 생애주기비용은 '프로젝트의 수명기간에 걸친 초기비용과 유지관리, 제시공, 보강,

복구 및 재포장 등과 같은 할인된 미래비용(discounted future cost)을 분석함으로써 프로젝트의 전체적인 경제적 가치를 평가하기 위한 프로세스'라고 정의할 수 있다(한국수자원공사, 2003). 사용자비용은 수도시설물의 전 생애주기 단계에서 공동구에 해당하는 도로 시설물을 점유하여 공사를 수행할 경우 도로나 교량의 일시적인 교통통제 및 우회시 도로의 이용자에게 부담되는 비용으로 통상 차량운행비용(vehicle operating cost), 시간지연비용(traffic delay cost), 사고비용(accident costs) 등으로 산정된다(한국수자원공사, 2003). 지역 경제적 손실비용 분석은 보수유지 조치, 긴급복구 조치 및 시설물의 해체·교체 시에 발생하는 수도공급 중단은 단수지역의 상업 및 산업에 영향을 초래하게 되며 여가 및 쇼핑 의욕저하, 생산물저하 등에 의한 지역경제손실을 산정하는 것이다. 이와 같은 세 가지 방법은 smart-pipe 시스템 도입에 따른 이익의 정량화 뿐 아니라 다른 사회간접망의 간접적 이익의 정량화에도 적용할 수 있다. 그러나 이들 방법의 적용은 이익의 정량화에 기여하는 인자의 선정과 개개 인자의 값을 산정하기 어렵기 때문에 현실적으로 적용이 어려운 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 실질적인 적용이 가능한 새로운 방법인 수용가불편시간(inconvenience time for customer)의 개념을 제안하였다. 수용가 불편시간은 man-hour단위로 표현되며, 낮은 수압 및 유량감소로 인한 사용성(serviceability) 저하 시간과 보수, 보강으로 인한 수용가의 단수 시간을 의미한다. 수용가

표 1. 일반 상수관시스템과 Smart-pipe시스템의 비교

구분	일반 상수관 시스템	Smart-pipe 시스템
적용분야	○ 비계획적인 교체나 갱생	○ 계획적인 교체나 갱생 ○ 교체나 갱생의 우선순위 결정 가능
장점	○ Smart-pipe시스템에 비해 저렴 ○ 다수의 시공경험	○ 교체나 갱생에 따른 손해의 최소화 - 교통체증의 최소화 - 단수통보를 통한 수용가의 사전대비 - 침수피해의 예방 - 파열에 의한 누수 최소화 ○ 정확한 파괴지점 탐색이 가능
단점	○ 교통량을 고려하지 못한 교체나 갱생 공사 ○ 급작스러운 용수공급 중단에 따른 수용가의 불편 ○ 파괴지점 탐색 불가능	○ 적은 시공 경험 ○ 고가의 초기비용

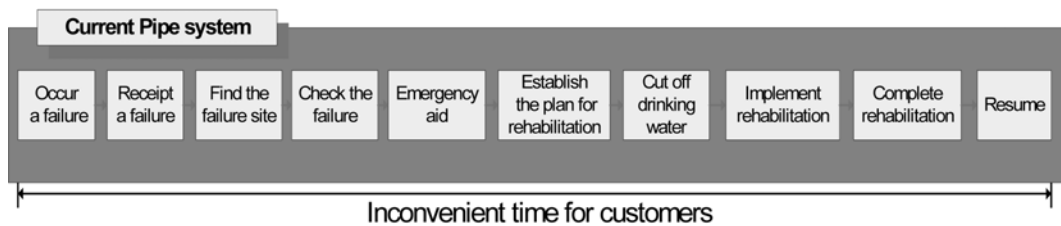


그림 2. 일반 상수관 시스템에서의 교체, 갱생 절차 (수용가 불편시간의 길이)

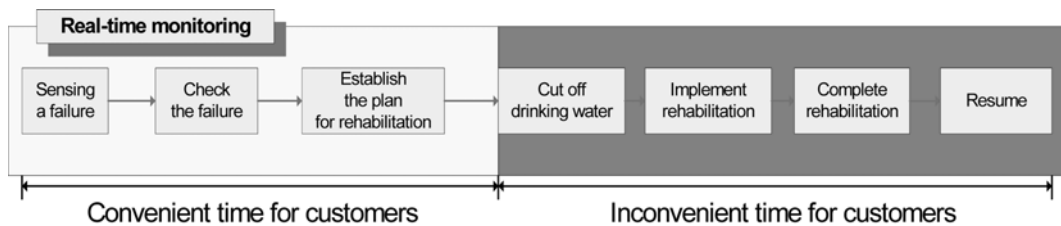


그림 3. Smart-pipe 시스템에서의 교체, 갱생절차 (단축된 수용가 불편시간)

불편시간의 정의는 상수도 파괴에 따른 일반적인 업무흐름도를 통해 설명 할 수 있다. 그림 2와 그림 3에는 한국수자원공사의 수도사고 업무흐름도를 참고하여 작성된 일반 상수도 시스템에서의 교체, 갱생 절차와 smart-pipe 시스템의 교체 갱생 절차가 나타나 있다.

그림 2와 그림 3에 나타난 것과 같이 일반 상수도 시스템의 경우 수용가에서 불편을 느끼는 시간은 관의 파괴가 발생한 시간부터 교체나 갱생이 완료되는 시점까지이나 smart-pipe시스템의 경우 수용가 불편시간은 상수도가 단수된 이후부터 교체나 갱생이 완료되는 시점까지이다. 즉, smart-pipe 시스템에서는 관파괴를 예측할 수 있기 때문에 현 상수도 유지관리 시스템에서 발생하는 급작스런 사고에서 응급조치까지의 수용가의 불편시간을 줄여줄 수 있다. 이처럼 감소된 불편시간을 smart-pipe 도입에 따른 간접이익으로 정의 하였다.

수용가 불편시간은 다음 식 (1)~(4)을 이용해 산정 할 수 있다.

$$B_s = M_c - M_s \quad (1)$$

$$M_c = N_f \times T_s \times P \quad (2)$$

$$M_c = N_f \times [(1-R) \times T_s + R \times T_p] \times P \quad (3)$$

$$N_f = \sum (C_f \times L \times S_L) \quad (4)$$

여기서,

$B_s$  : Smart-pipe 시스템 적용 시의 발생 이익(man-hour)

$M_c$  : 일반 상수도 시스템의 수용가 불편시간(man-hour)

$M_s$  : Smart-pipe 시스템의 수용가 불편시간(man-hour)

$T_s$  : 급작스런 관파괴로 인하여 소요되는 보수, 보강의 공사시간(hour/event)

$T_p$  : 계획된 교체나 갱생의 공사에 소요되는 시간(hour/event)

$N_f$  : 관 파손 횟수(event)

$P$  : 관망 시스템 내의 수용가의 수(number of man)

$R$  : 감소계수

$C_f$  : 관종별 파손 발생률(event/km/year)

$L$  : 관망 시스템의 관 총연장(km)

$S_L$  : 관종별 교체주기(year)

Smart-pipe 시스템 적용 시에 발생하는 이익은 일반 상수도시스템의 수용가 불편시간( $M_c$ )과 smart-pipe시스템의 수용가 불편시간( $M_s$ )의 차로 산정한다. 일반 상수도시스템의 수용가 불편시간( $M_c$ )은 관 파손 횟수( $N_f$ )와 급작스런 관파괴로 인하여 소요되는 교체나 갱생의 공사시간( $T_s$ ), 관망 시스템 내의 수용가의 수( $P$ )를 이용하여 산정되며, smart-pipe 시스템의 수용가 불편시간( $M_s$ )은  $N_f$ ,  $T_s$ ,  $P$ 이외에 추가적으로 계획된 교체나 갱생의 공사에 소요되는 시간( $T_p$ )와 감소계수( $R$ )를 이용하여 산정한다.  $R$ 은 smart-pipe를 적용함에 의해 감소되는 급작스런 관파괴 횟수의 비율을 의미하며, EPA(2005)에서는 0.2를 제시하고 있다.  $N_f$ 는 관종별 파손 발생률( $C_f$ )과 관망 시스템의 관 총연장( $L$ ), 관종별 교체주기( $S_L$ )를 이용해 산정하며, 지역별 특성에 따라 변하게 된다.

### 3. 적용 및 결과

본 연구에서는 실제 용수공급시스템인 고양 배수지에 적용하여, smart-pipe 시스템 사용 시에 발생하는 이익을 산정해 보았다. 고양 배수지의 급수인구는 11,000명이며, 상수관의 총연장은 4,610 m, 관거의 개수는 30개, 주요공급지점(지선 분기점)은 22개소이다. 관거의 직경은 50~200 mm로, 관종은 주로 도복장강관(CIP)으로 이루어져 있다. 그림 4와 표 2에는 대상지역의 관망도 및 관거의 재원을 나타내고 있으며, 식 (4)에서 사용되는 관종별 파손 발생률( $C_f$ )과 관종별 교체주기( $S_L$ )는 표 3 및 표 4에 나타나 있는 이현동 등 (2002) 및 한국수자원공사(2003)의 결과를 사용하였다.

고양배수지의 경우 각 중요용수공급지점마다의 수용가의 수와 같은 데이터가 충분치 않아, 관파괴가 발생하였을 경우 전체 수용가에게 영향을 미칠 수 있는 관들인 P1, P2, P8, P9, P13에 대한 수용가불편시간을 산정하였다. 5개관의 총 연장은 0.94 km이며 관종은 도복장강관이다. 관종별 파손 발생률( $C_f$ )과 교체주기( $S_L$ )는 표 3과 표 4에 나타나 있는 0.152 1event/km/year 와 20년(600 mm이하, 도복장강관 평균)을 적용하였다.

급작스런 관파괴에 따른 보수·보강 공사의 소요시간( $T_s$ )과 계획된 교체나 갱생의 공사에 소요되는 시간( $T_p$ )은 관종과 관파괴 종류에 따라 변하며 이에 대한 정확한 기준이 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 간단한 사고의 경우 소요되는 보수기

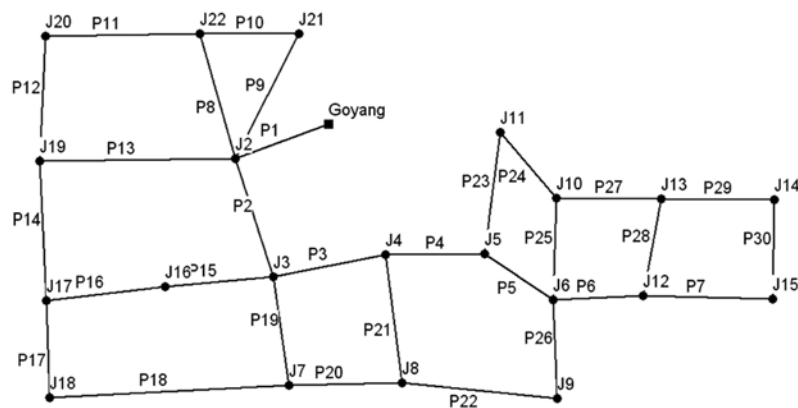


그림 4. 고양 배수지 관망도

표 2. 관 재원

관번호	길이(m)	직경(mm)	관번호	길이(m)	직경(mm)	관번호	길이(m)	직경(mm)
P1	165	200	P11	335	80	P21	98	80
P2	124	200	P12	115	80	P22	246	80
P3	118	150	P13	345	80	P23	174	80
P4	81	150	P14	114	80	P24	102	80
P5	134	150	P15	103	100	P25	92	80
P6	135	100	P16	261	80	P26	100	80
P7	202	80	P17	72	80	P27	130	80
P8	135	100	P18	373	80	P28	90	80
P9	170	80	P19	98	80	P29	185	80
P10	113	80	P20	110	80	P30	90	80

주) 자료 : 고양군 상수도확장사업기본계획 및 실시설계 보고서(고양군, 1986)

표 3. 관종별 파손 발생률 ( $C_f$ )

관 종	파손 발생률
CIP	0.1521 event/km/year
DCIP	0.0600 event/km/year

주) 자료 : 국내 중소도시 상수도관의 파손특성 및 영향인자 분석에 관한 연구(이현동 등, 2002)

간을 관련분야 실무자(수도관리사업소 등) 설문을 통해 조사하였다. 본 연구에서는 급작스런 관파괴에 따른 보수·보강 공사의 소요시간( $T_s$ )을 간단한 파손의 경우에 해당하는 10시간으로, 계획된 교체나 갱생의 공사에 소요되는 시간( $T_p$ )은 6시간으로 가정하였다. 이 의미는 수용가가 불편함을 느끼는 시간이 급작스러운 관파괴보다 4시간이 감소되었음을 의미한다.

표 5는 smart-pipe 시스템 적용 시에 발생하는 이익산정 결과를 나타내고 있다. 5개관에서 발생하는 관파괴 횟수( $N_f$ )는 2.86건으로 일반 상수관 시스템의 수용가 불편시간( $M_c$ )은 314,208 man-hours, smart-pipe 시스템의 수용가 불편시간 ( $M_s$ )

은 289,073 man-hours로 산정되었다. 즉, 고양배수지내 중요 관인 P1, P2, P8, P9, P13의 내구연한(이 경우  $S_L=20$ 년) 동안에 발생가능한 상수관 파괴에 따른 총 수용가 불편시간은 smart-pipe 시스템을 적용하는 경우 일반 상수관 시스템보다 25,125man-hours 수용가 불편시간을 줄일 수 있게 된다.

본 연구에서는 자료부족으로 5개 중요 관만을 이용하여 smart-pipe의 이익을 산정하였으나, 전체 중요용수공급지점마다의 수용가의 수와 같은 데이터가 충분하여 모든 관에 대한 smart-pipe 시스템 이익을 산정한 경우 실제 이익은 더 크다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

상수관은 대부분이 지중매설로 유지관리가 어려우며 합리적인 교체나 갱생의 시기를 결정은 중요한 문제이다. 상수관의 모니터링은 교체나 갱생의 시기 결정을 위한 지표로 사용될 수 있으며, 본 연구에서는 관의 상태를 실시간 모니터링

표 4. 관종별 교체주기( $S_L$ )

대분류	구분		평균 (년)	표준편차	변동계수	경계치(년)	
	중분류	소분류				하한값	상한값
송수관	덕타일주철관 (DCIP)	700 mm 이상	34	14.414	0.428	15.15	53.39
		400~700 mm	28	12.454	0.445	13.47	45.03
		400 mm 이하	27	10.354	0.385	12.70	40.07
	도복장강관 (CIP)	1,000 mm 이상	28	12.454	0.445	13.47	45.03
		600~1,000 mm	29	11.955	0.419	13.60	44.67
		600 mm 이하	20	6.977	0.358	9.69	27.64

주) 자료 : 수도건설사업 원가절감을 위한 LCC분석기법 적용방안 연구(한국수자원공사, 2003)

표 5. Smart-pipe 시스템 적용시 발생이익 산정 결과(내구연한 20년)

구분	산정 결과
$N_f = \sum(C_f \times L \times S_L) = 0.94(\text{km}) \times 0.1521(\text{event/km/year}) \times 20(\text{year})$	2.86 event
$M_c = N_f \times T_s \times P = 2.86(\text{event}) \times 10(\text{hour/event}) \times 11,000(\text{man})$	314,208 man-hours
$M_s = N_f \times [(1-R) \times T_s + R \times T_p] \times P = 2.86(\text{event}) \times [(1-0.2) \times 10(\text{hour/event}) + 0.2 \times 6(\text{hour/event})] \times 11,000(\text{man})$	289,073 man-hours
$B_s = M_c - M_s = 314,208(\text{man-hour}) - 289,073(\text{man-hour})$	25,125 man-hours

할 수 있는 센서가 부착되어 있는 smart-pipe 시스템의 개념을 소개하였다. 연구에 따른 결론을 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 일반 상수관으로 구성된 시스템에 비해 smart-pipe 시스템이 가지는 장점과 개념을 소개하였다.
- (2) Smart-pipe 시스템 적용을 위한 이익의 정량화 방안으로 수용가 불편시간 개념을 제시하였다.
- (3) 제시된 수용가 불편시간의 개념을 실제 관망인 고양배수지에 적용하여, smart-pipe 시스템 적용으로 인해 감소된 시간 손실 이익을 산정하였으며 Smart-pipe 시스템 도입에 따른 내구연한 20년 동안의 총 수용가 불편시간 감소는 25,125 man-hours로 산정되었다.

본 연구에서는 제시한 수용가 불편시간은 시간단위(man-hour)를 사용하여 산정한 이익이며, 이는 사회간접시설의 하나인 상수관망 파괴에 의한 직,간접적인 피해를 비용 단위로 환산하기 어렵기 때문에 도입한 개념이다. 따라서 보다 정확한 이익 산정을 위해서는 시간단위의 이익을 비용 단위로 환산하는 과정이 필요할 것이다. 그러나 비용 단위의 환산의 주관적인 측면과 자료 부족으로 객관적인 수용가 불편시간의 비용단위 환산은 인문사회적인 광범위한 협력연구를 통해서만 가능하리라고 생각된다. 하지만 본 논문에서 제시된 수용가 불편시간을 일종의 utility function으로 고려하여 각 지자체가 활용한다면 지자체 마다 처한 여건에 따라서 적절한 비용편익 분석이 가능하리라고 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 “2008년도 차세대 핵심환경기술개발사업 (GIS 기반의 비점오염물질 발생량 예측 모델개발)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

강병모, 홍인식 (2004) GIS상에서 TDR을 사용한 누수감지관과 모니터링 시스템에 관한 연구. **한국멀티미디어학회논문집**, 한국멀티미디어학회, 제7권, 제4호, pp. 567-578.

김응석, 김중훈, 이현동 (2002) 상수관로의 노후도 영향인자 및 가중치 산정에 관한 연구. **대한상하수도학회논문집**, 대한상하수도학회, 제16권, 제6호, pp. 686-699.

이현동, 정원식, 안윤주 (2002) 국내 중소도시 상수도관의 파손특성 및 영향인자 분석에 관한 연구. **대한상하수도학회논문집**, 대한상하수도학회, 제16권, 제4호, pp. 383-388.

조규덕 (2004) 지중 매설 열배관 보온재의 절연저항 변화 측정에 의한 배관감시 및 시스템 소개. **대한설비공학회 2004년 동계 학술발표대회 논문집**, 대한설비공학회, pp. 212-217.

한국수자원공사 (2003) 수도건설사업 원가절감을 위한 LCC분석기법 적용방안 연구. 한국수자원공사.

환경부 (2004) 2003 상수도 통계. 환경부.

Dingus, M., J. Haven, R. Austin. (2002) *Non-destructive, Non-invasive Assessment of Underground Pipelines*. AWWARF. Denver, CO, 116pp.

EPA (2005) *White Paper on Improvement of Structural Integrity Monitoring for Drinking Water Mains*. EPA.

Pendlebury, M., Karney, B.W., Tang, K.w. (2001) *Smart-pipe Systems-Concepts and Opportunities and Challenges*. Undergroundstructure Research : Municipal, Industrial and Environmental Applications, edited by Knight., Thomson.

Robert, C., Karen, A. M., John, R. (2002) *Smart Pipe Integral communication, Damage Detection, and Multiple Sensor Application in Pipelines*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.

- ◎ 논문접수일 : 08년 07월 21일
- ◎ 심사의뢰일 : 08년 07월 22일
- ◎ 심사완료일 : 08년 07월 30일