

# 상수도 관망의 유수율 제고 기술의 적용 및 분석

## Technical Application and Analysis for Reduction of Water Loss in Water Distribution Systems

김주환\*, 이두진\*, 배철호\*, 우형민\*

Juhwan Kim, Doojin Lee, Cheolho Bae, Hyungmin Woo

### Abstract

Non-revenue water reduction(NRW) technologies are implemented to evaluate and manage leakages scientifically in water distribution systems under local governments. A development of quantitative leakage indicator by measuring minimum night flow, pressure control policy by installation of PRV(pressure reducing valve) and the establishment of leakage prevention schemes by residual life modeling of deteriorated water pipes are reviewed and studied. Estimation models of allowable leakage are developed by measuring and analyzing minimum night flow at residential and commercial area in Nonsan city, which is suggested from UK water industry and can improve an existing leakage indicator for the evaluation of non-revenue water. Also, pressure control method is applied and analyzed to Uti distribution area in Sacheon city in the operation aspect. As results, 466 m<sup>3</sup>/day of leakage can be reduced and it is expected that 113million won of annual cost can be saved. In the part of corrosion velocity and residual life assessment, non-linear prediction models of residual thickness are proposed by assessment of corrosion velocity based on exposure years, soil and water quality etc., since the deteriorated water pipe play a major role to increase leakage.

It is expected that collection data and analyzing results can be applied effectively and positively to reduce non-revenue water by accumulating surveying data and verifying the results in the business field of water distribution systems under local governments.

*Key words:* Water Loss, Leakage, Non-Revenue water, Infrastructural Leakage Index(ILI)

### 요 지

본 연구는 지방상수도 배급수 관망의 유수율을 향상시키기 위하여 수량관리를 위한 블록시스템 구축을 통한 구역화 계량, 누수의 정량화를 위한 야간최소유량 측정을 통한 누수평가지표 및 국제 누수지수 ILI(Infrastructure Leakage Index)의 도입, 압력제어를 통한 누수저감 효과분석, 장기적인 계획수립을 위하여 노후수도관의 잔존수명 예측 등 누수를 평가·관리할 수 있는 기술을 개발, 제안하였다. N시 야간최소유량 측정을 통하여 주거지역과 상업지역에서 정량적인 누수평가지표로 관길이당, 급수전당의 허용기준누수량을 산정하였다. 이는 관망정비가 완료된 주거, 상업지역을 각각 대상으로 UK water industry에서 제안한 방법을 이용하여 실측을 통한 야간최소유량을 분석함으로써 유수율을 대신할 수 있는 허용누수량 산정식을 개발하였다. 압력제어를 통한 누수저감효과는 감압밸브의 설치를 통하여 수행되는데, 사천시 우티 배수구역을 대상으로 압력관리 구역을 4개로 분할하고 감압밸브 3개소, 가압펌프 1개소를 설치하여 압력을 조절한 결과 약 466 m<sup>3</sup>/day의 누수를 저감시킬 수 있을 것으로 나타나 압력관리를 통하여 연간 113백만의 비용절감효과가 기대되었다. 노후 상수도관의 부식속도 및 잔존수명 예측 연구에서는 매설년도, 토양 또는 수질특성에 따른 관체의 부식속도를 평가함으로써 잔존두께를 예측할 수 있는 모델을 개발하였으며 또한 부식으로 인한 공식특성에 따른 잔존강도 등을 평가할 수 있는 비선형회귀 모형을 개발, 수도관의 잔존수명예측에 활용하여 장단기 노후관 개대체 계획수립에 활용할 수 있도록 제안하였다.

본 연구의 결과들은 지방상수도의 유수율 제고 및 관망정비사업에 적극적으로 활용할 수 있는 누수평가 및 관리기법을 제안할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심어 :** 물손실, 누수, 유수율, ILI

- \* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : [juhwan@kwater.or.kr](mailto:juhwan@kwater.or.kr)
- \* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : [djlee@kwater.or.kr](mailto:djlee@kwater.or.kr)
- \* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : [chbae@kwater.or.kr](mailto:chbae@kwater.or.kr)
- \* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 · E-mail : [palose@kwater.or.kr](mailto:palose@kwater.or.kr)

## 1. 서론

수돗물은 국민의 건강과 국가발전 및 소비활동에 직결되는 필수적인 요소로서, 산업화 및 도시화와 더불어 그동안 양적인 면에서 많은 성장을 거듭하여 왔다. 2005년 12월말 현재 우리나라에서는 1,060개 급수구역(90시, 212읍, 758면)내에 전체인구의 90.7%인 약 44,671천명이 상수도를 공급받고 있다. 1인1일당 급수량은 363ℓ로 2004년(365ℓ/인·일)에 비해 다소 감소하였으며, '96년 이후 계속 감소하는 추세인데, 이는 절수기 설치와 물절약 운동의 전개 등으로 물사용량이 줄고, 우수율 제고사업의 지속적인 추진결과 누수율이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

유럽 등 선진국에서는 이미 80, 90년대부터 누수제어 및 저감에 관한 많은 연구를 수행하였으며, 최근에는 여러 가지 누수요인 중 실제 손실량을 허용누수 손실량 만큼 줄이기 위하여 다양한 방법이 시도되고 있다. 국내의 경우 급배수 관망은 지방자치단체가 운영, 관리하고 있으며 일부 특광역시를 제외한 중소도시 및 군단위 이하 지자체 관망의 누수실태는 매우 심각한 것으로 보고되고 있다. 또한 각 지자체에서는 배급수 관망관리를 통하여 우수율 제고의 필요성은 충분히 인식하고 있으나, 우수율 외에는 누수를 평가할 수 있는 개량화된 지표가 없으며, 우수율마저도 기본사용량에 크게 영향을 받기 때문에 누수를 정량적으로 평가할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 누수를 정량적으로 평가하고 개량할 수 있는 누수지표를 제시하고, 수리모델 구축 및 모의에 의한 압력제어 방안을 개발함으로써 배급수 관망의 운영관리 개선을 통한 우수율 향상 기술 개발을 목표로 하였다.

이를 위하여 본 과업에서는 지방상수도 배급수 관망의 우수율 제고를 위한 기술을 개발하는 것으로서 블록시스템과 같이 구역화를 통한 누수관리방안, 야간최소유량의 현장측정을 통한 누수관리 지표 개발, 누수저감을 위한 기술로서는 압력제어밸브 등의 설치를 통한 압력조절, 그리고 수도관의 노후화로 인해 발생할 수 있는 누수의 방지를 위해 노후관의 잔존수명 예측기법 등으로 구분하여 수행하였다.

상수관망의 과학적 누수관리를 위하여 실측을 통한 기준허용누수량(unavoidable leakage water)을 산정하고, 이를 누수저감 목표로 설정함으로써 누수의 정량적 평가가 가능하도록하고 정량적인 누수 평가기법을 토대로 압력제어, 체계적인 노후관 개체체 등의 누수관리기법을 적용할 수 있는 과학적 근거와 절차를 개발함으로써 실질적인 우수율 제고 사업에 활용할 수 있도록 하는 것이다.

## 2. 야간최소유량 측정에 의한 누수량 정량화

누수를 정량화 하는 작업은 누수관리에서 가장 먼저 선행되어야 할 작업이다. 우리나라에서 사용하고 있는 누수량이라는 용어는 상수도시설기준에서는 '수도관에서 새는 물'로 정의하고 있고 상수도통계에서는 '상수도사용자의 계량기 이전까지 발생한 누수량, 즉 노후 상수도관 등으로 부터 누수된 양'으로 정의하고 있다. 이러한 누수량을 평가하는 지표로는 우수율 즉, 용수공급량 중 수용가 계량기 계측을 통하여 요금부과가 가능한 유량의 비율을 의미한다. 그러나 우수율은 퍼센트 단위로 누수를 평가하는 지표이므로, 기저용수량의 변동에 의해 왜곡될 수 있고, 배수구역의 특성(배급수 관로연장, 수도전 수 등)이 다른 지역간에 상호비교가 어려운 단점이 있다. 최근 누수량 평가방법은 구역이 고립된 유역을 대상으로 야간유량 즉, 물사용량이 가장 적은 시간대 유량분석을 통하여 산정하는데, 이는 보다 합리적이고 과학적으로 누수를 정량화하는 방법으로 평가받고 있다. 따라서 영국의 Water Industry와 IWA를 중심으로 제시된 물수지분석을 통한 물손실량 산정방법의 일환으로서 야간유량측정을 통하여 실제 누수량을 정량화 하는 방법과 이를 이용하여

허용누수량을 산정하고자 주거, 상업지역을 대상으로 구역유량과 개별 계량기 유량을 실측함으로써 배급수 관로를 통한 실제 누수량을 정량화하였으며, 야간최소유량 분석을 통하여 배경허용누수량을 도출하였다.

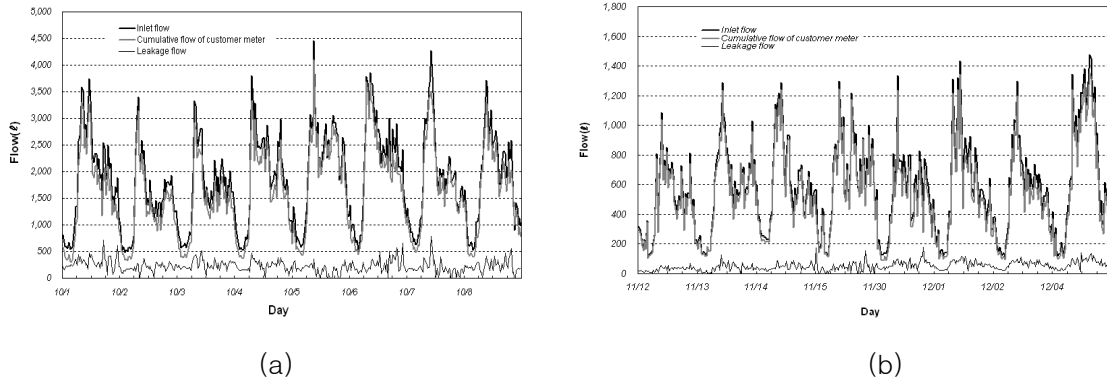


그림 1 주거지역(a) 및 상업지역(b) 대상관망의 유입유량, 계량기누적유량 및 누수량

UK water industry에서는 누수에 대한 관망의 건전성을 평가하기 위하여 기준허용야간유량이라는 개념을 도입하였으며, 이를 도출할 수 있는 산정식을 개발하였다.

기존 연구(WRC, 1994; 정, 2005)에서는 기준허용야간유량 산정식에서 배수관과 급수관 배경야간손실량을 관로 길이당, 수전수 당 손실량으로 구분하여 구하였는데, 이는 배수관과 급수관에서의 누수량 구분이 명확할 경우에 가능하다. 실측조사결과 이를 분리하여 측정하는 것이 사실상 불가능하므로 배수관 및 급수관 배경손실량을 배급수관로 총손실량으로 합산하여 관로길이당 원단위를 계산하였다.

(1) 주거지역

$$= [NFCUE + C_1 N_{h-s} + C_2 N_{non-h}] + [(C_3 N_{h-s} + C_4 N_{non-h}) + C_5 L] \times PCF$$

$$= [NFCUE + 4.34 N_{h-s}] + [0.31 N_{h-s} + 293.44 L] \times PCF$$

- 여기서, NFCUE : 예외적인 야간사용량 (l/conn/hr)
- C1 : 가정용 단독주택 야간사용량 계수 (l/conn/hr)
- C2 : 비가정용 야간사용량 계수 (l/conn/hr)
- C3 : 가정용 옥내급수관 배경손실량 계수 (l/conn/hr)
- C4 : 비가정용 옥내급수관 배경손실량 계수 (l/conn/hr)
- C5 : 배수관 배경손실량 계수 (l/km/hr)
- L : 배수관 연장 (km)
- N = N<sub>h-s</sub> + N<sub>non-h</sub> : 급수전 수 (connections)
- N<sub>h-s</sub> : 가정용 단독주택 급수전 수 (connections)
- N<sub>non-h</sub> : 비가정용 급수전 수 (connections)
- PCF : 수압보정인자

(2) 상업지역

$$= [NFCUE + C_1 N_{h-s} + C_2 N_{non-h}] + [(C_3 N_{h-s} + C_4 N_{non-h}) + C_5 L] \times PCF$$

$$= [NFCUE + 4.549 N_{h-s} + 5.524 N_{non-h}] + [0.222 N_{non-h} + 54.70 L] \times PCF$$

- 여기서, NFCUE : 예외적인 야간사용량 (l/conn/hr)
- C1 : 가정용 단독주택 야간사용량 계수 (l/conn/hr)
- C2 : 비가정용 야간사용량 계수 (l/conn/hr)
- C3 : 가정용 옥내급수관 배경손실량 계수 (l/conn/hr)
- C4 : 비가정용 옥내급수관 배경손실량 계수 (l/conn/hr)
- C5 : 배수관 배경손실량 계수 (l/km/hr)
- L : 배수관 연장 (km)
- N = N<sub>h-s</sub> + N<sub>non-h</sub> : 급수전 수 (connections)
- N<sub>h-s</sub> : 가정용 단독주택 급수전 수 (connections)
- N<sub>non-h</sub> : 비가정용 급수전 수 (connections)
- PCF : 수압보정인자

### 3. 관망 수압제어를 통한 누수저감

관망내 누수는 압력이 크면 증가되는 것이 일반적이기 때문에 여기서는 압력제어를 통해 단기적으로 유수율 향상 효과를 달성할 수 있는 방안을 도출하고자 압력제어 적용 및 사례를 제시하였다. 이를 위하여 그림 5.5와 같이 대상 구역의 기초자료 수집과 배수구역내 수압측정 및 분석, 관망해석모델의 구축 및 결과분석 등을 통하여 압력관리구역의 설정하고 감압밸브 및 가압펌프 설치 등을 검토, 압력제어 방안을 수립하였으며, 잠재적 누수 저감량을 산정함으로써 유수율 제고 효과를 분석하였다.

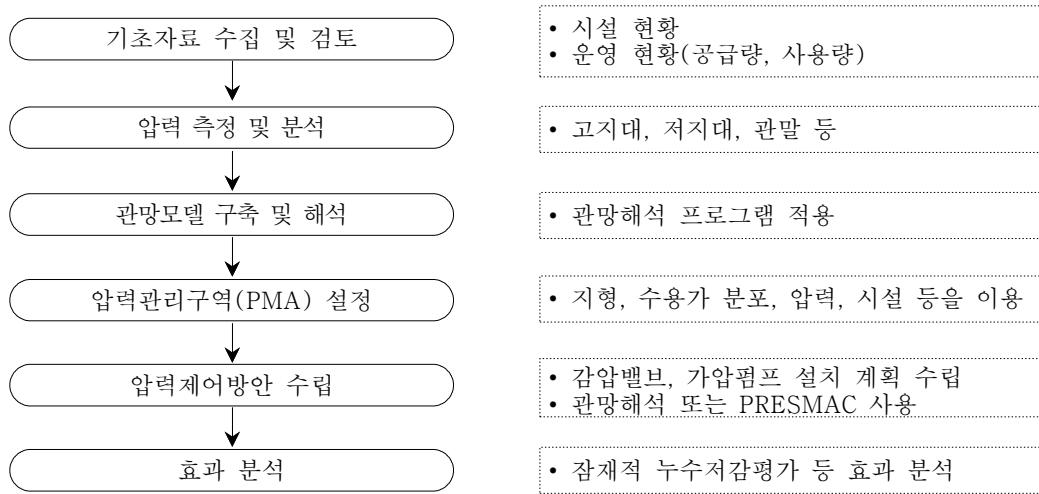


그림 2 압력제어방안 수립절차

대상관망의 유수율은 33%(2006년 4월 사용량 대비 공급량 기준)로서 매우 낮은 유수율을 보이고 있는 배급수지역을 중심으로 지형적특성을 분석하였다. 급수지역의 특성을 고려해 보면 각 계통으로 약 60m, 40m 정도의 고개가 존재하고, 나머지 대부분의 지역은 5m 이하의 낮은 지대를 형성하고 있어 배수지와 수용가의 표고차가 약 70m 정도로 나타나 7.0kg/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 압력이 발생하고 있을 뿐만 아니라 높은 압력으로 인해 관파손 및 누수가 예상되는 지역이다.

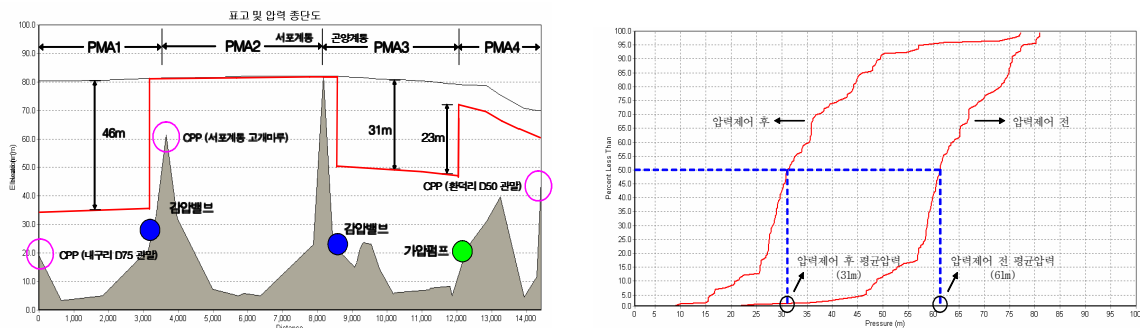


그림 3 압력제어를 위한 감압변 설치 및 효과분석

구축된 모델을 이용하여 압력분포를 분석한 결과 대부분의 지역이 4.0~9.0kg/cm<sup>2</sup>의 고수압이 형

성되고 있고 평균유속은 0.8m/s로서 0.3m/s이하인 관로가 전체의 95%로서 대부분의 관로가 유속이 낮은 것으로 나타나 배수구역내의 용수 사용량에 비해 관경이 과대하다는 것을 알 수 있었으며 압력제어 전 압력분포는 61m였으나, 압력제어 후에는 31m로 낮아진 것을 알 수 있다.

#### 4. 중장기 누수저감을 위한 노후관로 개량

상수관로에 대한 매설년수 또는 토양특성 또는 수질특성 등을 고려한 부식속도 모델을 제안하고자 국내 지자체 3개 시 및 광역상수도로부터 주철관종과 강관(CIP, DIP, SP 등) 등 총 135개 관체(Pipe body)를 평가하였다. 이중 CIP가 57개, DIP는 41개, SP는 37개 등이다. 이들 관로 매설년수로 보면 약 1964~2001년 정도이다. 관경별로는 80~2,800 mm까지이며, 100~500 mm 관경이 약 52%이었다. 수집 관체에 대하여 표면연마 후 내·외면 부식깊이를 측정된 결과, 외면 최대부식깊이는 CIP가 0.32~5.71 mm으로 타 관종에 비하여 외면 부식깊이가 높게 나타났으며, DIP는 그림 5.14에서 pc가 0.36~4.48 mm로 나타났으며, 주로 1.0~2.0 mm 수준의 pc가 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 내면 최대부식깊이도 CIP가 1.0~8.3 mm으로 높게 나타났으며, DIP는 대부분 내면이 시멘트모르타르 라이닝이 되어있는 경우에는 pc는 0.00 mm로 나타났으며, 시멘트모르타르가 없는 일부 DIP는 pc는 0.49 ~6.90 mm이었다. SP는 상대적으로 콜타르에나멜 또는 액상에폭시 등이 내면에 도장이 되어있는 경우에는, pc가 0.00 mm이었으며, 단 외면이 미도장이 되어 있거나 일부 탈리된 강관의 경우 pc는 약 0.48~3.00 mm 범위로 나타났다. 이들 자료를 토대로, 그림 4.14와 5.15에 매설년수에 따른 내·외면 부식속도 모델로 멱함수 모델(Kucera and Mattsson, 1987), 지수함수모델(Rajani et al., 2000), 그리고 선형모델 (Sheikh et al., 1990) 등을 도출하였다. 이들 세 모델 중 멱함수모델이 매설초기에 매우 빠르게 부식이 진행되는 경향을 보였으며, 선형모델을 제외하고 멱함수모델과 지수함수모델은 매설년수 10년 이후부터는 pc가 일정한 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 그림 4와 그림 5에서 pc를 매설년수로 나누어 표현된 내·외면 최대부식속도(External max. pit corrosion rate, 이하  $pe_{cr}$  또는  $Picr$ )는 매설년수에 따라 멱함수모델과 지수함수모델은 매설초기에 매우 빠르게 감소하는 경향을 보였고, 주로 10년 이후부터는 부식속도의 감소 폭이 매우 감소하는 경향을 보였다. 그림 5.16과 그림 4.17에서 측정된  $pe_{cr}$ 과  $Picr$ 은 경험적 모델에 의해서 예측된  $pe_{cr}$ 과  $Picr$ 상관성은 지수함수모델이 실측값과 상관성이 다소 높은 것으로 나타났다.

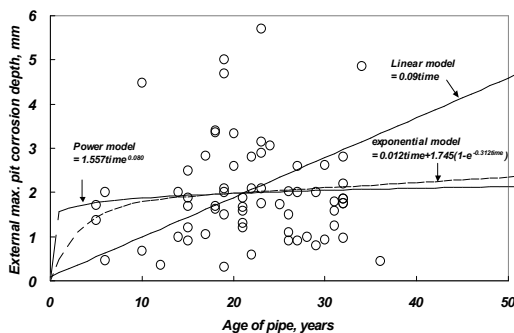


그림 4 외면최대공식깊이( $p_c$ ) 예측

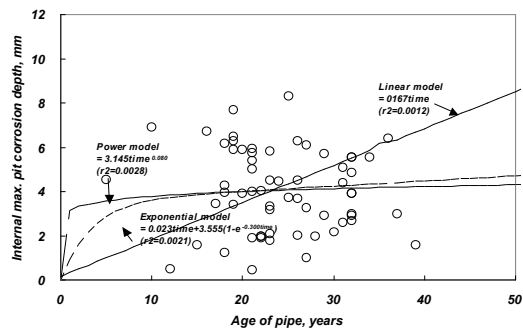


그림 5 내면최대공식깊이( $p_c$ ) 예측

#### 4. 결론

본 연구에서는 지방상수도 배급수 관망의 유수율 제고를 위하여 누수를 보다 과학적으로 평가하고 관리할 수 있는 기술을 개발하는 것을 목적으로 야간최소유량 측정을 통한 정량적인 누수평가 지표 개발, 누수저감을 위한 기술로서 압력제어밸브 등의 설치를 통한 압력조절 방안, 그리고 수도관의 노후화로 인해 발생할 수 있는 누수의 방지를 위해 노후관의 잔존수명 예측기법 개발 연구를 수행하였다. 관망정비가 완료된 주거, 상업지역을 각각 대상으로 UK water industry에서 제안한 방법을 이용하여 실측을 통한 야간최소유량을 분석함으로써 유수율을 대신할 수 있는 허용누수량 산정식을 개발하였다. 또한 압력제어를 통한 누수저감을 위하여 감압밸브를 설치함으로써 누수를 저감시킬 수 있는 방안에 대하여 검토하였으며 증장기 노후관로의 개대체 계획수립을 위하여 노후 상수관로의 부식속도 및 잔존수명 예측을 위한 모델을 개발하였다. 이 결과들은 개발모델의 현장 적용성 검증을 통하여 지방상수도 유수율 제고사업이나 관망정비사업 추진시 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project인 수처리선진화사업단(과제번호:I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Atkinson K., Whiter J.T., Smith P.A., Mulheron M.(2002), "Failure of small diameter cast iron pipes", Urban Water, pp.263~271
2. AWWA, 1999. AWWA Manual m'6. Water Audits and Leak Detection. Manual of Water Supply Practices. AWWA, Denver.
3. Deb A.K., Grablitz F.M., Hasit Y.J., Snyder J.K., "Prioritization water main replacement and rehabilitation", AWWARF, 2002. pp.1~113
4. Dempsey, P., Manook, B.A. (1986), Assessing the condition of cast iron pipes, WRc United Kingdom, pp. 1~40.
5. Lambert, A. & Hirner, W., (2000). Losses From Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. Intl. Water Assn.
6. Lambert, A. et al, (1999). A Review of Performance Indicators for Real Losses From Water Supply Systems. Aqua, 48:6:227.
7. Lambert, A., (2001). What Do We Know About Pressure: Leakage Relationships? Proc. IWA Conf. on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. IWA, London.
8. McKenzie, R.S. & Lambert, A.O., (1992). Development of a Windows based Package for Assessing Appropriate Levels of Active Leakage Control in Potable Water Distribution Systems. South African Water Research Commission Report TT169/02. Pretoria, South Africa.
9. O'day, D.K., Weiss, R., Chiavari, S., Blair, D.(1986)7, "Water main evaluation for

Rehabilitation/Replacement, Dnver, Colo., AWWARF and AWWA

10. Rajani B., Maker J.(2000), "Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life", AWWARF, pp.1~249.
11. Rossum, J.R.(1969), "Prediction of Pitting in ferrous Metal From Soil Parameters", Jour. AWWA, 61(6), pp.305~310.
12. Seica, M.V., Packer, J.A., Grabinsky, M.W.F., Adams, B.J., Karney, B.W., (2000), "Evaluation and testing of cast iron and ductile iron water main samples", Final report to city of Toronto, Department of civil engineering, University of Toronto, Ontario, pp.1~203.
13. Thornton, J. et al, (2002). Water Loss Control Manual. McGraw-Hill, New York.
14. WRc (Water Research Center), (1994). Managing Leakage, 1994. Reports A?J. Engineering and Operations Committee, WRc, Swindon, U.K.