

# 상수관로의 효율적 유지관리를 위한 수명 평가 방법

## A Life Evaluation Method for Efficient Maintenance of Water Mains

최창록\* / 박수완\*\* / 김정현\*\*\* / 배철호\*\*\*\*

Choi, Chang Log / Park, Suwan / Kim, Jeong Hyun / Bae, Cheol Ho

### 요 지

본 연구에서는 상수관로의 잔존수명을 통계적 기법 중 하나인 비례위험모형(PHM)에 적용하여 평가하였다. 비례위험모형을 구축하기 위한 개별관로의 생존시간은 관로의 파손율이 한계파손율에 도달하는 시간으로 정의하였다. 즉, Park and Loganathan(2002)에서 제시한 GPBM을 적용하여 시간에 따른 개별관로의 파손율을 추정하고 추정된 파손율과 한계파손율의 상등관계를 통해 생존시간을 산정하였다. 또한, 본 연구대상관로에 대한 GPBM을 구축함에 있어, 매설시점에서 누적파손횟수를 0으로 한 파손기록을 입력자료에 추가하는 방법과 가중계수(WF)의 범위를 수정함으로써 기존의 GPBM을 보완하였다. 이로써 파손사건이 최소 1회 이상 기록된 강관 및 주철관에 대한 비례위험모형을 구축하였다. 이와 같이 수정된 방법론은 관로 파손사건 등의 자료의 축적이 미비한 국내 여건에서 비례위험모형 및 GPBM과 같은 통계적 모형을 구축할 때 유용할 것으로 사료된다. 본 연구대상관로의 비례위험모형에 포함된 유의한 공변수는 관종과 관경 그리고 길이이며 관종은 비례성 가정을 위배하여 시간종속형 변수로 모형화되었다. 최종 채택된 PHM모형을 통해 생존함수를 추정하였으며 추정된 생존함수를 이용하여 개별관로의 잔존수명 및 경제적 수명 그리고 각 수명에 대한 95% 신뢰구간을 산정하였다. 또한 개별관로의 경제적 수명에 영향을 미치는 공변수의 위험비율도 분석하였다. 분석결과 강관의 평균 경제적 수명은 약 25.1년이고 주철관은 약 21년으로 산정되었다. 또한 관종에 따른 경제적 수명에 도달할 상대적인 위험률은 전반적으로 주철관이 높으나 20년 이상 매설된 관로에서는 강관의 위험률이 높을 것으로 분석되었다. 관경과 길이는 크기에 비례하여 상대적 위험률도 증가하였다.

**핵심용어** : 잔존수명, 비례위험모형, GPBM, 한계파손율, 생존시간, 상수관로

### 1. 서 론

상수관로의 노후로 인한 누수 및 수질저하로 인한 경제적 손실을 줄이기 위해 정부와 지방자치단체에서는 노후수도관 개량사업의 일환으로 1997년부터 2011년까지 노후관 4만2천km를 교체하는 방안을 수립하였으며, 총 사업비는 3조8천억 원이 소요될 것으로 예상하고 있다(환경부, 2003). 이와 같이 노후수도관 개량사업은 많은 비용이 소요되므로 노후관을 합리적으로 판별하여 계획을 수립하고 사업을 추진해야 한다.

상수도 배수관로의 파손율을 모형화하는 방법론적 접근에는 크게 물리적 방법론과 통계적 방법론으로 구분할 수 있다. 그리고 비례위험모형(Cox, 1972)은 배수관로의 파손율을 위험률의 형태로 모형화하는 대표적인 통계적 모형으로, 파손인자의 영향을 산정하는 함수와 시간에만 의존한 파손경향을 표현하는 기저함수를 분리할 수 있으며, 또한 파손에 영향을 주는 인자들에 대한 상대

\* 부산대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : [changlog@hanmail.net](mailto:changlog@hanmail.net)

\*\* 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수 · E-mail : [swanpark@pusan.ac.kr](mailto:swanpark@pusan.ac.kr)

\*\*\* K-water 연구원 상하수도 연구소 수석연구원 · E-mail : [jhkim@kwater.or.kr](mailto:jhkim@kwater.or.kr)

\*\*\*\* K-water 연구원 상하수도 연구소 선임연구원 · E-mail : [baech@kwater.or.kr](mailto:baech@kwater.or.kr)

적인 위험률을 산정하는 것이 가능하다. 또한 기저함수를 추정할 때 임의의 분포형을 고려하지 않으므로 관로에 대한 다양한 파손경향을 모형화할 수 있다. 비례위험모형을 이용하여 배수관로의 파손율을 모델링한 연구의 대표적인 사례로 Andreou et al.(1987), Constantine et al.(1993), Li et al.(1992) 및 Park(2004)이 있다.

본 연구에서는 관로의 파손기록과 매설환경 및 비용자료 등을 이용하여 관로의 파손율경향과 한계파손율을 산정하였으며 관로의 파손율과 한계파손율의 상등관계를 이용하여 비례위험모형의 구축을 위한 생존시간을 정의하였다. 그리고 관로의 제원과 매설환경 및 생존시간을 이용하여 비례위험모형을 구축하며 이를 통해 개별관로에 대한 생존함수를 추정하였다. 추정된 생존함수는 관로의 생존율이 0.5에 도달하는 중간생존시간을 산정하며 이를 관로의 경제적 수명으로 간주하여 잔존수명을 평가하였다. 또한 기존 관로파손 예측모형을 개선하여 파손기록이 충분하지 않은 관로에 대한 통계적 접근이 가능한 방법도 개발하였다.

## 2. 잔존수명 평가를 위한 비례위험모형 구축 과정

연구대상 상수관로는 1963년 이후 매설된 총 7308개의 개별관로로 구성되어 있으며, 관종에 따라 분류하면 강관이 53.5%, 주철관(CIP와 DCIP)이 41.6%로 대부분을 차지하고 있었다. 그리고 파손기록은 1980년 이후 파손사건을 정리하였으며 전체 관로 중 파손사건이 1회 이상 기록된 관로는 강관 및 주철관이 415개이고 기타 관종은 90개를 차지하고 있다.

본 연구에서 제안된 방법론은 파손사건과 보수 및 교체비용이 기록된 관로에만 적용이 가능하다. 파손사건이 없거나 비용에 관한 자료가 없는 개별관로는 비례위험모형의 구축을 위한 생존시간을 산정할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 파손사건이 1회 이상 기록되고 보수 및 교체비용이 산정된 강관과 주철관 415개 개별관로에 대해 비례위험모형을 구축하여 잔존수명을 평가하였다.

### 2.1 생존시간의 산정

비례위험모형을 이용하여 상수관로 잔존수명을 평가하기 위해서는 개별관로에 대한 생존시간의 정의는 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 관로 파손예측 모형인 General Pipe Break Prediction Model(GPBM)(Park and Loganathan, 2002)과 관로의 한계파손율(Loganathan et., 2002)의 상등관계를 이용하여 경제적 교체시점(Park and Loganathan, 2002)을 산정하고 이를 개별관로의 생존시간으로 정의하여 비례위험모형에 적용하였다. GPBM과 한계파손율 간의 관계는 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\ln\left(\frac{1+R}{1+i}\right)}{\ln\left(1+\frac{C}{F \cdot L}\right)} = \frac{d}{dt} \left[ WF \cdot B_{\text{exp}} e^{A_{\text{exp}}(t-t_0)} + (1-WF) \cdot (B_{\text{lin}} + A_{\text{lin}}(t-t_0)) \right] \quad (1)$$

Eq. (1)의 좌변은 관로의 한계파손율, 그리고 우변은 GPBM의 파손율을 나타낸다. Eq.(1)의  $R$ 은 이자율,  $i$ 는 인플레이션을,  $C$ 는 파손된 관로의 보수비용,  $F$ 는 단위길이당 교체비용,  $L$ 은 관로의 길이를 나타낸다. 그리고  $WF$ 는 가중계수(weighting factor)로 0에서 1사이의 값을 가지며  $A_{\text{exp}}$ ,  $B_{\text{exp}}$ ,  $A_{\text{lin}}$ ,  $B_{\text{lin}}$ 는 곡선접합계수(curve fitting coefficients)를 나타내고  $t-t_0$ 는 매설 후 경과시간이다.

본 연구에서는 Eq (1)을 통해 생존시간을 산정함에 있어 자료의 부족으로 인해 통계적 접근이 제한적이었다. 따라서 본 연구에서는 매설시점에 누적파손사건횟수를 '0'으로 설정하고 가중계수(WF)의 범위를  $0 < WF \leq 1$ 로 사용하는 수정된 GPBM의 방법론을 적용함으로써 GPBM을 통한 통계적 접근이 가능하도록 하였다.

## 2.2 모형의 공변수와 회귀계수 산정

본 연구에서는 관중, 관경, 길이, 수중, 도로유형 및 관접속방식을 공변수로 고려하였다. 모형의 구축은 공변수에 대한 단일변수분석(univariate analysis)을 통해 유의한 공변수를 선택한 후 유의한 공변수를 중심으로 다중변수분석을 수행함으로써 모형의 유의성을 검토하였다. 모형 간 통계적 유의성 검토는 log-likelihood ratio statistic ( $-2\text{Log } PL$ ) 및 Akaike Information Criterion(AIC)으로 검사하는 Collet(2003)의 방법을 수행하였으며, 이 때, 관중과 관경 그리고 길이의 공변수로 구성된 모형이 가장 통계적 유의성이 높은 모형으로 채택되었다.

또한 비례위험모형에서 채택하고 있는 가장 중요한 가정은 비례성 가정(Proportionality Assumption)으로 이는 시간에 따라 공변수의 위험률이 변하지 않음을 의미하며 비례성 가정은 표준화된 스코어 잔차와  $\log(-\log S(t))$  vs.  $\log(t)$  그래프를 이용하여 검토하며 가정을 위배하는 공변수는 시간중속변수로 취급한다.

본 연구에서는 관중과 길이 및 관경에 대해 비례성 가정을 검토하였으며 관중만이 비례성 가정을 위배하는 공변수로 결정되었다. 따라서 관중을 시간중속변수로 취급하여 모형을 재구축하였다.

그리고 비례위험모형의 기저생존함수는 기록된 각 파손시점에 대한 기저생존확률의 추정치 ( $\hat{S}_0(t)$ )의 로그-로그 변환값( $\ln(-\ln \hat{S}_0(t))$ )을 적절한 함수형으로 근사시켜서 구한다. 따라서 본 연구에서 추정된 생존함수는 Eq (2)와 같다.

$$\hat{S}_i(t) = \exp(-e^{-21.272t^{3.7297}} \exp(3.15205type - 0.82687dia - 0.19184length - 0.01357type \cdot Time)) \quad (2)$$

추정된 비례위험모형은 Therneau *et al.*(1990)이 제안한 각 모형의 이탈 잔차(deviance residual)로 적합도를 검증하였으며 그 결과 본 연구의 비례위험모형은 적합한 것으로 판단되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 잔존수명 평가

본 연구에서는 개별관로의 생존율이 0.5에 도달하는 중간생존시간(median survival time)을 경제적으로 그 수명이 다한 시점으로 정의하여 개별관로의 잔존수명을 평가하였으며 본 연구의 잔존수명 평가 결과는 보수비용과 교체비용사이의 경제적 가치에 따른 관로의 수명을 의미한다.

연구대상 415개 개별관로의 평균 중간생존시간은 23년 6개월이었으며 이 중 강관의 평균 중간생존시간은 약 25.1년이며, 주철관은 21년으로 추정되었다. 그리고 415개 개별관로 중 220개 개별관로는 현재(2007년 12월)를 기준으로 중간생존시간을 초과한 것으로 나타났으며 이는 그 개별관로가 이미 관로의 경제적 수명을 다한 것으로 볼 수 있다. 한편, 중간생존시간에 아직 도달하지 않은 나머지 195개 개별관로에 대해 평가된 잔존수명의 평균은 7.1년이며 이 중 강관의 평균 잔존

수명은 8.6년이고 주철관의 평균은 5.4년으로 산정되었다. 즉, 이러한 195개의 관로는 평균적으로 현재로부터 약 7년 이후에는 경제적 수명이 다한 상태에 도달할 것으로 예상된다.

본 연구에서 주철관의 경우 경제적 수명이 21년으로 다소 적게 분석되었는데 이는 주철관 중 내면에 시멘트 몰타르가 된 주철관(DCIP)과 그렇지 않은 주철관(CIP)의 구분 없이 분석되어 상대적으로 파손이 잦은 CIP의 영향으로 사료되며 특히 주철관은 중도절단율(percent censored)이 약 60%로 다소 높았으므로 그 결과에 대한 신뢰성이 다소 낮을 것으로 사료된다.

### 3.2 위험률 분석

관종(type)의 위험비율(hazard ratio)은 23.384이고 95% 신뢰구간은 '1'을 포함하지 않으므로 관종에 따른 경제적 수명에 도달하는 상대적인 위험률은 주철관(CIP 및 DCIP)이 강관(SP)에 비해 23.3배 높은 것으로 분석된다. 하지만 관종(type)은 시간종속 효과로 인해 위험비율(hazard ratio)이 시간에 따라 변하게 되어 매설 후 약 19년이 경과하면 강관(SP)의 위험률이 주철관에 비해 상대적으로 증가하는 것으로 나타난다. 관경(dia)과 길이(length)도 위험비율(hazard ratio)의 95% 신뢰구간이 1을 포함하지 않으며, 경제적 수명에 도달하는 위험률은 관경이 크고 길이가 길수록 감소하는 것으로 나타난다.

## 4. 결론

본 연구는 연구대상 상수관로 중 1회 이상 파손기록이 있고 보수 및 교체 비용이 제공된 강관 및 주철관을 대상으로 잔존수명을 평가하였으며 관로의 경제적 수명에 영향을 미치는 인자들의 영향을 통계적으로 평가하였다.

연구대상 상수관로 중 강관의 경제적 수명의 평균은 약 25.1년이었으며, 주철관의 경제적 수명의 평균은 21년으로 추정되었고 강관의 잔존수명의 평균은 약 8.6년, 주철관의 평균은 5.4년으로 추정되었다. 모형에서 최종 선택된 공변수 중 관종은 시간종속형 변수로 매설초기 개별관로의 경제적 수명에 도달하는 위험률은 주철관이 높으나 20년 이상 매설된 관로의 경우는 강관이 더 높을 것으로 분석되었다.

아직 파손사건이 발생하지 않은 관로는 본 연구에서 평가할 수 없었으나 후 파손 또는 누수사고가 1회 이상 발생할 경우 해당 관로의 자료를 구축된 생존함수에 적용하여 관로의 잔존수명과 그 통계적 신뢰구간을 산정하는 것이 가능하다. 뿐만 아니라, 본 연구에서 개발된 방법론은 연구대상 관망이 아닌 다른 상수관망의 관로파손기록 및 매설환경 등의 다양한 영향인자에 대한 자료를 축적함으로써 해당관로의 잔존수명 및 그 통계적 신뢰구간을 산정하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국수자원공사 K-water 연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 환경부 (2003). *물관리종합대책 실천계획*. pp. 3-6. 환경부, 서울
- Andreou, S. A., Marks, D. H. and Clark, R. M. (1987) "A New Methodology for Modeling Break Failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Applications." *Advances in Water Resources*, **Vol. 10**, pp. 11-20.
- Collet, D. (2003). *Modelling Survival Data in Medical Research*. pp. 80-87 . Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, U.S.A.
- Constantine, A. G. and Darroch, J. N., In S. Osaki, D. N. P. Murthy. (1993). *Pipeline Reliability: Stochastic Models in Engineering, Technology and Management*, World Scientific, Singapore.
- Cox, D. R. (1972). "Regression Models and Life Tables." *Journal of Royal Statistic Society*, **Vol. 34**, No. 2, pp. 187-220.
- Li, D. and Haims, Y. Y. (1992). "Optimal Maintenance-related Decision Making for Deteriorating Water Distribution Systems 1. Semi-Markovian model for a water main." *Water Resources Research*, **Vol. 28**, No. 4, pp. 1053-1061.
- Loganathan, G. V., Park, S., and Sherali, H. D. (2002). "Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, **Vol. 128**, No. 4, pp. 271-279.
- Park, S. (2004). "Identifying the Hazard Characteristics of Pipes in Water Distribution Systems by using the Proportional Hazards Model: 1. Theory." *KSCE Journal of Civil Engineering*, **Vol. 8**, No. 6, pp. 663-668.
- Park, S. and Loganathan, G. V. (2002). "Optimal Pipe Replacement Analysis with a New Pipe Break Prediction Model." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, **Vol. 16**, No. 6, pp. 710-716.
- Therneau, T. M. and Grambsch, P. M. and Fleming, T. R. (1990). "Martingale-based residuals for survival models." *Biometrika*, **Vol. 77**, No. 1, pp. 147-160