

개별관로 정의 방법을 이용한 상수관로 파손을 모형화 및 경제적 교체시기의 산정

Modeling of the Failure Rates and Estimation of the Economical Replacement Time of Water Mains Based on an Individual Pipe Identification Method

박수완* / 이형석** / 배철호*** / 김규리****

Park, Suwan / Lee, Hyeong Seok / Bae, Cheol Ho / Kim, Kyu Lee

Abstract

In this paper a heuristic method for identifying individual pipes in water pipe networks to determine specific sections of the pipes that need to be replaced due to deterioration. An appropriate minimum pipe length is determined by selecting the pipe length that has the greatest variance of the average cumulative break number slopes among the various pipe lengths used. As a result, the minimum pipe length for the case study water network is determined as 4 m and a total of 39 individual pipe IDs are obtained. The economically optimal replacement times of the individual pipe IDs are estimated by using the threshold break rate of an individual pipe ID and the pipe break trends models for which the General Pipe Break Prediction Model(Park and Loganathan, 2002) that can incorporate the linear, exponential, and in-between of the linear and exponential failure trends and the ROCOFs based on the modified time scale(Park et al., 2007) are used. The maximum log-likelihoods of the log-linear ROCOF and Weibull ROCOF estimated for the break data of a pipe are compared and the ROCOF that has a greater likelihood is selected for the pipe of interest. The effects of the social costs of a pipe break on the optimal replacement time are also discussed.

keywords : deterioration, break rate, break trend, individual pipe, optimal replacement time, ROCOF

요 지

본 연구에서는 상수관망에서 개별적으로 노후도가 심하여 개량이 필요한 구간을 보다 정확하게 구분하기 위해 새로운 개별관로 정의 방법이 개발되었다. 적절한 관로 최소구성성분 길이를 결정하기 위하여 여러 가지 관로 최소구성성분 길이에 대한 평균 누적파손횟수경사선의 분산값을 비교하여 가장 큰 분산값을 나타내는 관로 최소구성성분 길이인 4 m 를 연구대상 지역의 상수관망에 적용하였으며 관로 ID는 39개로 구분되어졌다. 관로의 경제적 최적교체시기는 한계파손율과 관로의 파손경향모형을 이용하여 결정되었는데, 각 관로 ID에 대하여 관로의 선형적 파손경향, 지수적 파손경향 또는 선형과 지수형 사이에 있는 파손경향 모두에 적용될 수 있는 General Pipe Break Prediction

* 교신저자, 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수
Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Civil & Env. Eng., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea
(e-mail: swanpark@pusan.ac.kr)

** 한국수자원공사 밀양댐관리단
Miryang Dam Office, Korea Water Resources Corporation, Miryang 627-812, Korea

*** K-water 수자원연구원
K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Deajeon 305-730 Korea

**** 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정
Master's Course, Dept. of Civil & Env. Eng., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

Model(Park and Loganathan, 2002)과 수정된 시간척도를 이용한 ROCOF(Park et al., 2007)를 적용하여 연구대상 상수관망의 최적교체시기를 산정 및 분석하였다. ROCOF 모형화 과정에서 대수-선형과 와이블 ROCOF를 적용 후 최대로그우도 추정값을 비교하여 최대로그우도가 큰 값을 가지는 ROCOF를 각 관로 ID의 ROCOF로 사용하였다. 관로파손으로 인한 사회적 비용이 관로의 최적교체시기에 미치는 영향도 분석되었다.

핵심용어 : 노후도, 개별관로, 파손경향, 파손율, 최적교체, ROCOF

1. 서 론

상수관로의 효율적인 유지관리를 위해 국내외적으로 많은 연구와 방법론이 개발되어졌다. 대표적인 국외사례로 Shamir and Howard(1979)은 시간과 관로의 파손율에 대한 관계를 얻기 위하여 회귀분석을 적용하여 관로의 보수 및 교체비용을 최소화하는 관의 최적교체시기를 산정하였으며, Walski *et al.*(1982)은 한계파손율 이론을 증명하였으며, Shamir and Howard(1979)의 관로 파손율 예측 모델을 적용하여 관로의 일정 기간 동안의 보수비용을 교체비용과 같다고 가정하고 관로의 최적교체시기 추정값을 유도하였다. Clark *et al.*(1982)은 첫 번째 파손시간을 예측하는 식과 첫 번째 파손 후의 파손횟수를 예측하는 식을 결합하는 모델을 제안하였으며 첫 번째 파손 후의 파손횟수를 예측하는 식은 다양한 외부인자들의 상대적인 영향을 설명하고자하는 관점에서 시간이 경과됨에 따라 지수적으로 증가한다고 가정하였다. Kettler and Goulter(1985)은 특정지역의 주철관과 콘크리트관에 대하여 관경과 시간에 대한 파손횟수에 대한 회귀분석 방정식을 제안하였으며, Deb *et al.*(1997)은 KANEW로 불리는 1년 단위로 교체되어야 할 관로의 길이를 추정하는 확률적 모델을 제안하였다. Kleiner and Rajani(2001)은 통계학적 노후도 평가방법을 결정론적 모델과 확률론적 모델로 구분하였고, 확률론적 모델에 대한 세부분류로써 확률론적 다중변수군(probabilistic multi-variate group) 및 확률론적 단일변수군(probabilistic single-variate group)으로 구분하여 관로의 노후도 예측과 관련된 선행 연구에 대한 자세한 검토 및 분석을 수행하였다.

한편 대표적인 국내 연구사례로 조치현 등(2000)은 강릉시 포남동 일원의 상수도 시설자료를 지형공간정보체계로 구축하고 한국수자원공사에서 개발한 수도관 노후도 평가 모델과 연계하여 연구대상 지역의 상수관로 노후도를 평가하였으며, 김응석 등(2002)은 배수관로의 노후화 및 파손에 영향을 미치는 영향인자와 영향인자별 가중치를 제안하고 확률론적 신경망이론을 응용한 노후도 예측 모델에 적용하여 연구결과를 검증하였다. 이현동 등(2002)은 시설의 노후, 차량통행량과

계절의 변화, 수층압, 지반침하 등의 관 노후도 인자 항목과 km당 관종별 파손율을 제시하였고, 정원식 등(2003)은 다중회귀분석, 군집분석 등과 같은 통계학적인 분석방법을 이용하여 상수관로의 노후도에 대한 환경영향인자의 상관성을 분석하고 가장 큰 영향인자가 관의 재질, 매설지역의 환경조건, 토양과 수질의 특성임을 제시하였다.

본 논문에서는 상수관로의 유지관리를 위한 개별관로의 정의 방법을 개발하였으며 이를 연구대상 지역의 상수관망에 적용하였다. 이러한 방법으로 정의된 개별관로 ID에 대하여 관로의 경제적 교체시기를 산정하였다. 관로의 경제적 교체시기는 관로의 파손시간 자료에 기초한 파손율 함수와 관로의 한계파손율을 이용하여 관로의 경제적 교체시기를 산정하는 Loganathan *et al.*(2002)의 방법론을 이용하여 산정하였다. 즉, 관로의 시간에 따른 파손 경향을 모형화하는 ROCOF와 General Pipe Break Prediction Model(GPBM)을 이용하여 각 관로 ID의 파손율을 분석하였으며, 이러한 두 가지 모형과 관로의 한계파손율과의 상등관계를 이용하여 개별 관로 ID의 최적교체시기를 MATLAB을 이용하여 산정하고 그 결과를 분석하였다.

2. 관로 ID(Identification Code)의 개념

일반적으로 관로에서 발생하는 누수 혹은 파손은 관로의 특정 구간에 집중되는 경향이 있다. 이러한 관로의 구간에 따라 다른 파손특성을 무시한 채 많은 누수 혹은 파손이 일어나는 구간과 그렇지 않은 구간이 혼재된 비교적 긴 관로를 하나의 관로로 취급하여 교체할 경우 그 관로의 파손율은 과대평가되어 비경제적으로 교체될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 실제적인 관로의 최적교체시기 파악이 이루어질 수 있도록 파손횟수를 고려한 관로 ID 부여 방법을 다음과 같이 개발하였다. 먼저, 관망도상에서 연속되는 관로의 길이를 X축으로 놓고 관로를 균등한 길이의 최소구성성분으로 세분한 다음, 관로의 각 최소구성성분 위에 그 성분에서 발생한 파손횟수를 Fig. 1의 막대그래프와 같이 표시한다.

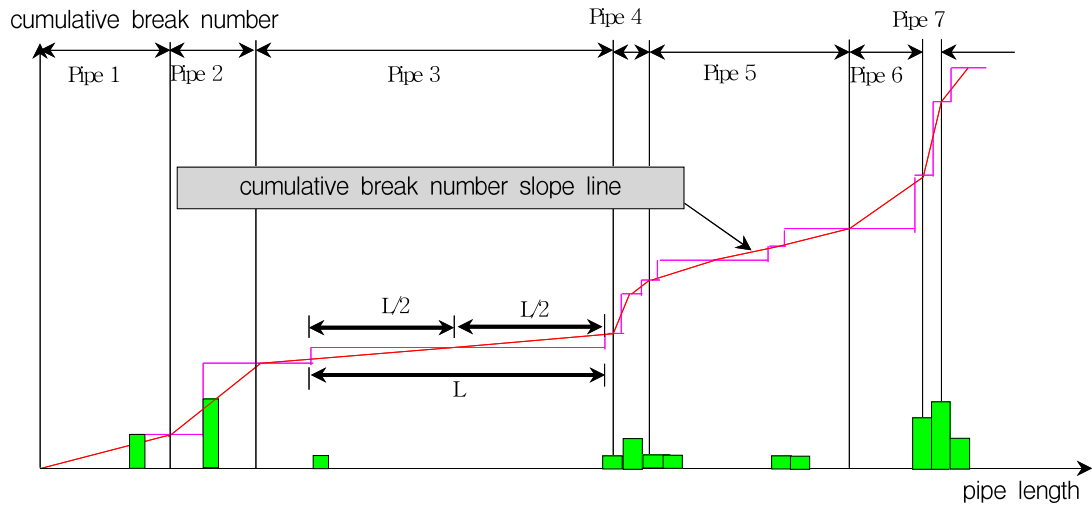


Fig. 1. Pipe ID Identification Based on the Cumulative Break Number

Fig. 1에 표시된 막대그래프(관로 최소구성성분의 파손횟수)를 이용하여 관로의 길이방향으로의 누적파손횟수를 나타내면, 누적파손횟수는 파손이 발생한 관로의 최소구성성분에서 파손이 발생한 횟수만큼 도약하게 되며 파손이 일어나지 않은 구간에서는 일정한 값을 가지는 계단모양을 나타내게 된다. 따라서 도약이 크게 발생한 지점과 연속해서 발생한 구간이 파손이 많이 발생한 구간을 뜻하게 된다. 이러한 누적파손횟수의 변화를 좀 더 체계적으로 구별하기 위하여 누적파손횟수의 값이 일정한 구간들의 중간점들을 연결한다. 그 결과로 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 계단의 모양이 바뀔 때마다 기울기가 변하는 직선(누적파손횟수경사선)들이 얻어지며 이러한 경사선에 대응하는 관로를 하나의 관로 ID로 정의할 수 있다. 또한, 이러한 '누적파손횟수경사선'의 기울기의 변화가 미미한 구간의 관로들은 통합되어 하나의 관로 ID로 정의 될 수 있다. 한편 관로 최소구성성분의 길이는 관로 ID 부여 대상이 되는 관로 전체의 파손경향에 따라 달라지므로 최적의 관로 최소구성성분의 길이는 관로의 파손경향을 고려하여 산정되어

야 한다.

3. 연구대상 지역의 관로 ID 구분

연구대상 지역인 U공업용수도는 연장이 총 209 km이며 관로의 매설년도는 1963년부터 2005년까지이고 총 연장의 50% 이상이 20년 이상 경과된 시설이다. 또한 U공업용수도의 관종은 강관, 터널, DP관, PC관, HP관이 각각 56.04%, 21.55%, 8.79%, 7.74%, 6.18% 이고 관경은 500 mm이하 4.80%, 1000 mm이하 27.02%, 1500 mm 23.74%, 2000 mm이하 16.72%, 2500 mm 16.21%, 3000 mm 이하 9.69%, 3500 mm이하 1.82%로 구성되어있다. 한편, 관로 파손자료에는 1981년 1월부터 2004년 12월까지 각 관로의 재질, 매설시기, 관경, 연장 등에 대한 자료와 파손사건에 대한 시간 및 위치에 대한 자료가 기록되어 있으며 Fig. 2와 같이 계통별로 발생하여 총 파손횟수는 150건이다. 연구대상 관망을 간략하게 나타내면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3과 같이 연구대상 지역의 상수관망은 일련의 연속된 관로로 이루어져 있지 않다. 따라서 연구대상

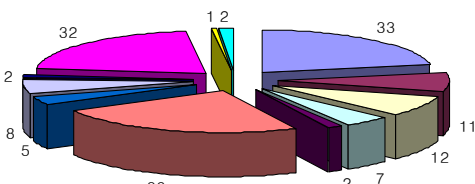


Fig. 2. The Number of Breaks of the U Water Supply System

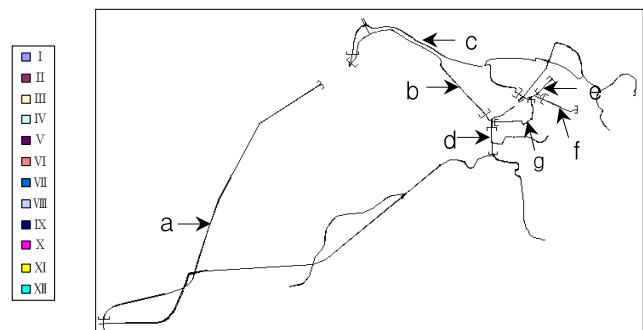


Fig. 3. A Schematic Diagram of the Case Study Water Network

관망을 하나의 관로로 형성시키기 위하여 연구대상 지역을 급수 계통으로 분리한 다음, 계통 내에서 가장 긴 관로로부터 시작하여 분기되는 관로들을 연결해 나가는 방식으로 연구대상 지역의 상수관망을 일련의 연속된 관로로 치환하였다. 예를 들어 연구대상 지역의 관망도를 나타내는 Fig. 3에서 a계통과 같이 연속되는 관로들로 이루어진 하나인 계통인 경우에는 우선 관을 일직선의 관로라 가정하고 한 계통에서 두 개의 계통으로 나뉘는 b 및 c계통 중 b 계통을 a 계통 다음에 연결하였으며, 그 다음에 c 계통을 연결하였다. 또한 d, e, f, g 계통과 같이 b와 c계통에서 분기되는 계통에 대해서는 c계통 뒤에 알파벳 순서대로 연결하여 연구대상 관망을 연속된 직선관로로 치환하였다.

이러한 방법으로 정의된 연구대상 지역에 대한 일련의 연속된 관로에 대하여 관로 최소구성성분의 길이를 1 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m, 200 m, 400 m, 600 m, 800 m, 1 km, 2 km, 4 km, 6 km, 8 km, 10 km 로 가정하고 가정된 각 관로 최소구성성분 길이에 대한 누적파손횟수경사선을 구하였다. 관로 최소구성성분의 길이가 가장 먼저 시작하는 지점은 치환된 직선관로의 최왼쪽 지점으로 설정하였다. Fig. 4는 관로 최소구성성분의 길이를 10 km 로 하였을 경우에 대한 누적파손횟수경사선을 나타낸다.

가정한 각 관로 최소구성성분에 대한 누적파손횟수경사선을 구한 뒤 연결되는 누적파손횟수경사선들 간의 편차를 구한다. 즉, Fig. 4에서 ①번 누적파손횟수경사선과 ②번 누적파손횟수경사선의 편차, ②번 누적파손횟수경사선과 ③번 누적파손횟수경사선의 편차, ③번 누적파손횟수경사선과 ④번 누적파손횟수경사선의 편차 등으로 누적파손횟수경사선들 간의 편차를 구한다. 이렇게 구하여진 각 관로 최소구성성분에 대한 누적파손횟수경사선의 편차에 대해 평균값을 구하고, 각 누적

파손횟수경사선들 간의 편차값을 비교하여 편차들의 평균값보다 작은 편차값은 편차 평균값보다 큰 누적파손횟수경사선과 동일한 누적파손횟수경사선으로 간주하고 하나의 동일한 관로 ID로 정의한다. 예를 들어, Fig. 4에서 ③번과 ④번의 누적파손횟수경사선의 편차값이 편차 평균값 보다 크고 ④번과 ⑤번의 누적파손횟수경사선의 편차값이 편차 평균값보다 작다면 ⑤번의 누적파손횟수경사선을 ④번의 누적파손횟수경사선과 동일한 누적파손횟수경사선으로 재분류하고 하나의 관로 ID로 정의하는 것이다.

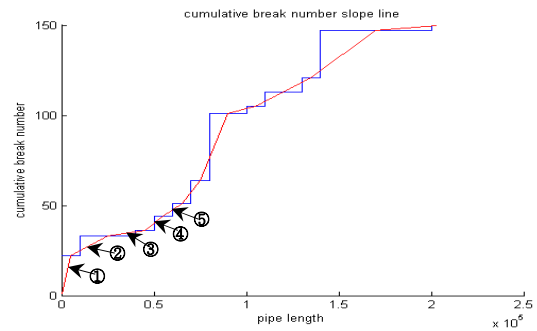


Fig. 4. Cumulative Break Number Slope Line for the Minimum Pipe Length of 10 km

사용된 관로 최소구성성분을 이용하여 재분류된 하나의 관로 ID내의 누적파손횟수경사선을 다시 구하고 누적파손횟수경사선의 경사들에 대한 분산값을 구한다. 이렇게 구하여진 각 관로 최소구성성분에 대한 누적파손횟수경사선의 경사에 대한 분산값들을 비교하여 분산값이 가장 큰 값을 관로 최소구성성분 길이로 결정한다. 분산값이 가장 큰 값으로 관로 최소구성성분 길이로 결정하는 이유는 분산이 클수록 다양한 경사를 가지는 누적파손횟수경사선을 얻을 수 있고, 결과적으로 전체 관망을 관로의 파손율이 다양하게 구분되도록 관로

Table 1. Variances of the Cumulative Break Number Slope Lines for Various Minimum Pipe Lengths

Length	Variance	Length	Variance
1 m	0.00192565	200 m	0.00002812
2 m	0.00215915	400 m	0.00001686
4 m	0.00236236	600 m	0.00001201
6 m	0.00094996	800 m	0.00000795
8 m	0.00097303	1 km	0.00000834
10 m	0.00141023	2 km	0.00000589
20 m	0.00008812	4 km	0.00000551
40 m	0.00008830	6 km	0.00000303
60 m	0.00007119	8 km	0.00000261
80 m	0.00004701	10 km	0.00000347
100 m	0.00003454		

를 구분하여 관 교체에 필요한 구간만을 평가할 수 있기 때문이다. 연구대상 관망에 이러한 방법을 적용하였을 경우 가정한 관로 최소구성성분 길이의 누적파손횟수경사선의 경사에 대한 분산값은 Table 1과 같다.

각 관로 최소구성성분 길이에 대한 누적파손횟수경사선의 경사 중 관로 최소구성성분이 4 m일 때 그 분산값이 가장 큰 것으로 나타났으며 대체적으로 관로 최소구성성분 길이가 짧아질수록 분산값이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구대상 관망에 대해서는 관로 최소구성성분을 4 m 길이로 결정하였고, 연구대상 지역의 상수관망은 총 길이 209 km 중 39개의 관로 ID로 구분되어졌으며 39개의 각 관로 ID에 대한 최적교체시기를 산정하였다.

일반적으로 매우 복잡한 모양을 가지는 상수관망에 대하여 본 논문에서 개발한 관로 ID 부여 방법을 적용시키기 위해서는 관로를 하나의 선으로 구성하여야 한다. 이러한 경우 물리적으로 연결되지 않은 관로들을 하나의 직선으로 만들어야 하므로 어떤 관로를 어떤 관로에 연결해야하는가라는 문제가 발생한다. 본 연구대상지역의 경우에는 관로 ID를 부여할 때 계통별 연결지점에 대하여 한 계통의 시작이나 끝 구간에 파손이 많이 발생하고 다른 계통의 끝이나 시작구간에 파손이 많이 발생하지 않은 경우, 파손이 많이 발생하지 않은 부분이 파손이 많이 발생한 부분과 연결되어 하나의 관로 ID로 구분될 수 있다. 그러나 연구대상 지역의 파손분포를 살펴볼 때 대체적으로 계통의 중간부분에서 파손이 많이 발생하여 관로를 연결하는 순서가 바뀌더라도 최종 분석값인 관로의 최소구성성분길이에는 큰 변화가 발생하지 않았다. 즉 송수관망과 같이 관망이 비교적 간단하여 눈으로 보았을 때 다른 관로들과 구분되는 길이가 짧은 관로들이 매우 많지 않은 경우 본 논문의 연구대상지역의 관로들에 대해 적용한 바와 같이 임의로 관로들을 연결하여 전체 관로를 하나의 직선 관로로 구성하더라도 산정되는 관로의 최소구성성분길이는 관로 연결 방법에 따라 큰 변화가 없을 것으로 사료된다. 그러나 더욱 복잡한 모양을 가지는 배수관망에 대하여 본 논문에서 개발한 관로 ID 부여 방법을 적용시키기 위해서는 관로를 하나의 선으로 구성하기 위한 보다 체계적인 방법론이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

4. ROCOF 모형화 및 최적교체시기 산정

4.1. ROCOF 모형화

연구대상 지역의 상수관망을 4 m 길이의 관로 최소구성성분으로 관로 ID를 부여하고 각 관로 ID의 파손

시간자료를 이용하여 파손을 모형화 하기 위하여 대수-선형 ROCOF와 와이블 ROCOF를 적용하였으며 Eqs. (1) 및 (2)는 각각 대수-선형 ROCOF와 와이블 ROCOF를 의미한다.

$$v(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t) \quad (1)$$

$$v(t) = \gamma \delta t^{\delta-1} \quad (2)$$

여기서, β_0 , β_1 , γ 및 δ 는 매개변수이다.

Park *et al.*(2007)은 관로의 파손시간 자료를 ROCOF에 적용할 경우 파손 시간자료가 장대한 시간 척도를 가짐에 따라 발생할 수 있는 ROCOF의 매개변수 수렴 불안정성을 해결하기 위하여 수정된 시간척도를 적용하였다. 또한 수정된 시간척도 하의 매개변수를 이용한 Eqs. (1) 및 (2)를 한계파손율과 파손을 함수간의 상등 관계에 적용하므로써 대수-선형 ROCOF와 와이블 ROCOF를 이용한 최적교체시기를 각각 Eqs. (3) 및 (4)와 같이 개발하였다.

$$t = \frac{t_0}{\beta_1} (\ln(t_0 \cdot Brk_{th}) - \beta'_0) \quad (3)$$

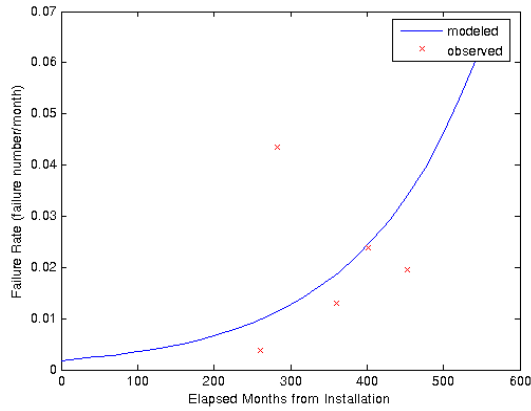
$$t = t_0 \left(\frac{t_0 \cdot Brk_{th}}{\gamma' \delta'} \right)^{\frac{1}{\delta'-1}} \quad (4)$$

여기서, t_0 는 가장 최근에 기록된 파손시간이고 β'_0 , β'_1 , γ' 및 δ' 는 수정된 시간척도 하의 매개변수이다.

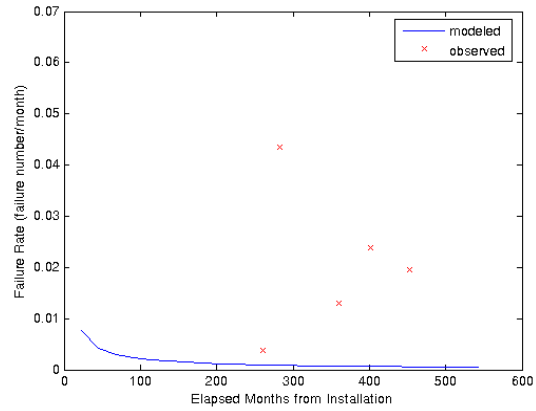
파손율을 모형화하기에 필요한 최소한의 파손 횟수(3회)를 가지는 16개 관로 ID에 대해 파손율을 모형화하고 최적교체시기를 산정하였다. Fig. 5는 관로 ID 25번에 대한 ROCOF 모형화 하였을 경우 파손율 그래프를 나타낸다.

4.2. ROCOF 모형화를 이용한 최적교체시기 산정

각 관로 ID들에 대하여 대수-선형 ROCOF와 와이블 ROCOF의 최대우도 추정값을 산정 후 비교하였을 때 Table 2와 같이 관로 ID 1, 3, 5, 14, 16, 19, 31, 32, 34, 37에 대하여서는 와이블 ROCOF의 최대우도 추정값이 대수-선형 ROCOF 최대우도 추정값보다 크게 나타났으며 관로 ID 8, 11, 13, 23, 25, 27에 대하여서는 대수-선형 ROCOF 최대우도 추정값이 와이블 ROCOF의 최대우도 추정값보다 큰 것으로 나타났다. 또한 최대우도 추정값이 클수록 실제 파손율과 근접한 파손율을 나타내는 모형을 의미하기 때문에 최대우도 추정값이 큰 ROCOF를 그 관로 ID에 대한 파손율 모형으로 선택하였다.



(a) Log-linear ROCOF



(b) Weibull ROCOF

Fig. 5. The ROCOF Plots for Pipe ID-25

Table 2. Comparisons of the Maximum Log-likelihoods and the Estimated Parameters of the ROCOFs

Pipe ID	Log-linear MLE	Weibull MLE	Chosen ROCOF	β_0 or δ	β_1 or γ
1	-76.237	1.403	Weibull	0.147	9.577
3	-205.291	-7.449	Weibull	0.147	3.775
5	-391.786	-6.466	Weibull	0.143	2.574
8	691.322	-10.419	Log Linear	1.339	1.335
11	60.366	-7.853	Log Linear	2.235	0.133
13	297.107	-7.169	Log Linear	0.945	0.826
14	-23.173	-7.444	Weibull	0.150	2.074
16	-34.396	-8.102	Weibull	0.149	3.321
19	-765.776	-5.213	Weibull	0.143	1.293
23	524.903	-9.459	Log Linear	1.213	1.064
25	1431.507	-9.567	Log Linear	-0.185	2.922
27	768.679	-8.236	Log Linear	-1.248	4.050
31	-751.232	-5.340	Weibull	0.142	1.285
32	-929.303	-5.654	Weibull	0.140	1.732
34	-396.891	-5.825	Weibull	0.146	1.256
37	-806.663	-6.275	Weibull	0.141	2.585

관로 파손이 발생하면 단순히 관로 보수비용만 소요 되는 것이 아니라 주변 지역 건물들의 침수 피해 등 여러 가지 간접적인 사회적 보수비용이 발생할 수 있으므로 이를 반영할 필요성이 있다. 따라서, 최적교체시기 산정 과정에서 한계파손율의 보수비용에 사회적 보수비용을 추가하여 반영하였다. 이에 대하여 Cooper *et al.*(2000)은 관로 파손으로 인한 주위피해 예상액 등을 나타내는 사회적 보수비용을 GIS와 연계한 계산방법을 개발하였으나 본 연구에서는 사회적 보수비용을 정확하게 추정하지 않고 관로 파손 보수비용의 0%, 100%, 500%, 1000%, 5000%, 10000% 비율로 가정하여 한계파손율의 보수비용에 추가하였다. 또한 이자율과 인플레이션율은 각각 5%와 3.9%로 한국은행에서 발행하는 기준금리와 소비자 물가지수를 적용하였다. 관로의 보수

비용과 교체비용은 연구대상 관로들에 대한 비용 자료가 부족하여 Park and Loganathan(2002)이 사용한 미국의 자료를 이용하였다. ROCOF 모형에 의한 사회적 보수비용 비율에 따른 각 관로 ID의 최적교체시기는 Park and Loganathan(2002)의 한계파괴율(Threshold Break Rate)과 Park *et al.*(2002, 2007)의 한계파손율과 GPBM의 미분식 및 ROCOF 사이의 상등관계를 이용하여 산정하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3에서 사회적 보수비용 비율에 따라 최적교체시기가 매설시기 이전으로 분석되는 것은 ROCOF로 산정되는 관로의 매설 이후의 모든 시간에서의 파손율이 그 관로의 한계파괴율 보다 크게 산정되었기 때문이다. 즉, 본 논문의 방법론에 의하면 관로의 최적교체시기는 관로의 파손율이 한계파괴율과 같게 되는 시간을 의미

Table 3. Economically Optimal Replacement Times of the Individual Pipe IDs Based on ROCOF

Pipe ID	installation time	s=0	s=1	s=5	s=10	s=50	s=100	ROCOF
1	1975	1975.9	1977.0	1982.2	1989.2	2043.9	2100.0	Weibull
3	1976	1976.1	1976.1	1976.5	1977.0	1981.6	1987.5	Weibull
5	1976	1976.2	1976.4	1977.5	1979.0	1990.5	2002.3	Weibull
8	1964	2050.4	2028.2	1993.4	1974.5	1929.6	1912.1	Log Linear
11	1977	2412.8	2088.9	1582.2	1309.8	676.0	437.6	Log Linear
13	1977	1954.3	1932.8	1903.7	1890.6	1866.3	1858.5	Log Linear
14	1977	1978.8	1980.8	1988.6	1996.9	2033.5	2056.0	Weibull
16	1977	1978.6	1980.6	1988.6	1998.0	2047.2	2081.4	Weibull
19	1977	1979.8	1982.7	1991.5	1999.1	2025.4	2039.3	Weibull
23	1966	2079.1	2052.5	2010.7	1988.0	1933.6	1912.1	Log Linear
25	1966	2041.9	2032.2	2016.8	2008.4	1987.5	1978.7	Log Linear
27	1991	2003.9	2001.2	1997.0	1994.8	1990.0	1988.3	Log Linear
31	1974	1976.8	1979.5	1988.1	1995.4	2020.8	2034.2	Weibull
32	1974	1977.6	1981.3	1992.8	2002.7	2037.6	2056.2	Weibull
34	1974	1975.8	1977.8	1984.5	1990.7	2014.1	2027.1	Weibull
37	1974	1974.2	1974.3	1975.2	1976.4	1985.9	1995.9	Weibull

s : Social costs(100%)

하므로 컴퓨터 프로그래밍 내에 특별한 조건을 주지 않으면 최적교체시기가 비록 매설시기 이전으로 산정되더라도 산정된 파손율이 한계파괴율과 같으면 그 시간을 최적교체시기로 출력하게 된다. 따라서 이러한 관로들은 관로의 기록된 자료에 따른 파손율이 한계파손율에 비해 높은 관로들이므로 계산에 사용된 사회적 비용을 고려한다면 분석 대상 시점에서 지체 없이 교체되는 것이 총유지관리 비용을 절약하는 방안이 될 것으로 사료된다.

한편 Table 3을 분석해보면 와이블 ROCOF로 모형

화하는 것이 더욱 적합한 관로 ID 1, 3, 5, 14, 16, 19, 31 32, 34, 37은 사회적 보수비용이 증가할수록 교체시기가 늦어짐을 알 수 있다. 이는 Kleiner and Rajani (2001)에 의하여 언급되어진 바와 같이 관로는 보수가 가능하므로 관로의 내용년수 주기는 일반적으로 Fig. 6과 같은 욕조(bathtub)형 ROCOF곡선을 가진다는 내용과 관련하여 설명되어질 수 있다. 예를 들어, Table 4는 관로 ID-14의 사회적 보수비용에 따른 한계파손율이며 이 값들을 욕조형 ROCOF곡선에 표시하였을 경우 Fig. 6의 이점쇄선(-----)과 같이 표현되어질 수 있다. 한계

Table 4. The Threshold Break Rate of Pipe ID-14 for Various Social Costs

Pipe ID	s=0	s=1	s=5	s=10	s=50	s=100
14	0.0095	0.0050	0.0019	0.0012	0.0005	0.00038

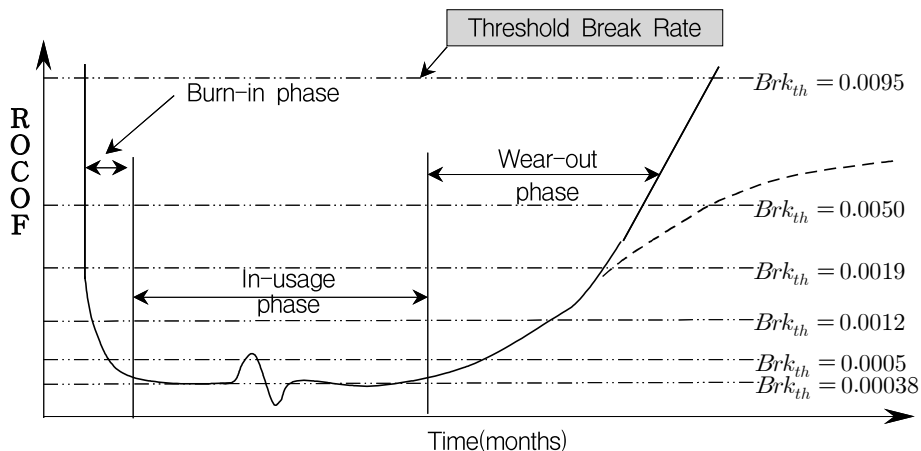


Fig. 6. The Bathtub Curve of the Life Cycle a Buried Pipe(Kleiner *et al.*, 2001)

파손율과 육조형 ROCOF곡선이 만나는 지점을 관로 ID의 교체시기라고 할 때 관로의 파손율이 육조형 곡선의 Wear-out Phase, 즉 관로의 파손이 관로의 노후에 의해 발생하는 구간과 같은 형태를 가질 경우에는 Fig. 6에서와 같이 사회적 보수비용이 증가할수록 한계파손율은 감소하게 되고, 따라서 최적교체시기도 앞당겨지게 된다. 반대로, 육조형 곡선의 Burn-in Phase에서는 사회적 보수비용이 증가할수록 한계파손율은 감소하게 되고 한계파손율이 감소하면 교체시기가 늦어지는 현상을 알 수 있다. 따라서 사회적 보수비용이 증가할수록 교체시기가 늦어지는 관로 ID 즉, 와이블 ROCOF가 더욱 적합한 관로는 육조형 곡선과 비교 시 관로가 Burn-in Phase에 존재하는 것으로 판단됨에 따라 관로의 최적교체시기 결정은 향후 발생하는 파손 경향을 고려하여 결정되어야 할 것으로 사료된다.

5. General Pipe Break Prediction Model(GPBM)의 적용 및 최적교체시기 산정

5.1. GPBM의 적용

Park and Loganathan(2002)에 의해 개발된 GPBM은 Eq. (5)와 같으며 Shamir and Howard(1979)에 의해 사용되어진 지수형 모델의 단점 즉 지수형 모델이 장래 관로 파손횟수를 과다하게 예측하는 경향을 보완하였다. 또한 관로의 선형, 지수형 또는 그 중간 사이의 파손경향에 전부 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

$$N_c(t) = (1 - WF)(A_{lin} + B_{lin}(t - t_0)) + WF \cdot B_{exp} \cdot \exp(A_{exp}(t - t_0)) \quad (5)$$

여기서, $N_c(t)$ 는 시간 t 에서 관로의 누적파손횟수, t 는 매설 후 경과년수, t_0 는 분석을 위한 기준년수(매설시기 또는 자료를 사용할 수 있는 처음 년도), WF 는 주어진 자료에서 최상의 모델을 결정하는 가중계수, A_{lin} 및 B_{lin} 는 선형모형의 접합계수, A_{exp} 및 B_{exp} 는 지수형 모델의 곡선접합계수이다. 또한 Park and Loganathan(2002)은 한계파손율을 Eq. (5)의 t 에 관한 미분과의 상등관계를 이용하여 관로의 최적교체시기를 Eq. (6)과 같이 표현하였다.

$$t^* = \frac{1}{A_{exp}} \ln \left(\frac{Brk_{th} - (1 - WF) \cdot A_{lin}}{WF \cdot A_{exp} \cdot B_{exp} \cdot e^{-A_{exp} \cdot t_0}} \right) \quad (6)$$

Park *et. al.*(2002)의 방법을 이용하여 추정한 연구대상 관로 ID들의 곡선접합계수들(A_{lin} , B_{lin} , A_{exp} , B_{exp})과 가중계수는 Table 5와 같다.

GPBM 모형화 과정에서는 관로 ID-39에서 이상값(outlier)이 발견되지 않아 관로 ID-39를 포함하여 총 17개의 관로 ID에 대하여 분석하였다. Fig. 7은 관로 ID-32에 대한 GPBM을 그래프로 나타낸다.

한계파손율 산정에 사용된 이자율과 연간 인플레이션율은 ROCOF 모형화 과정과 동일한 값을 사용하였고

Table 5. Curve Fitting Coefficients and Weighting Factors of the GPBM for the Pipe IDs

Pipe ID	A_exp	B_exp	B_lin	A_lin	WF
1	0.1066	2.4125	1.1688	-2.5651	0
3	0.1131	0.8528	0.4478	-1.2649	0.21
5	0.0716	1.1993	0.2184	0.7088	0.96
8	0.0813	0.5356	0.3451	-3.6854	0
11	0.0923	1.2119	0.4378	-0.6372	0
13	0.0690	0.6834	0.1322	0.2466	1
14	0.1052	0.5481	0.2474	-0.6651	1
16	0.0855	1.0464	0.3505	-0.6465	0
19	0.2780	0.1119	0.4710	-2.7227	1
23	0.1486	0.0837	0.4851	-8.1770	0
25	0.0899	0.1869	0.2332	-3.8320	0.04
27	0.6947	0.0007	2.7528	-29.2081	1
31	0.1769	0.2353	0.3013	-1.4816	1
32	0.2225	0.2121	0.4777	-2.5352	0.27
34	0.2038	0.1097	0.3685	-3.0772	0.26
37	0.1971	0.3297	0.5251	-2.3787	1
39	10.7506	1.5545E-64	18.0000	-245.0000	0

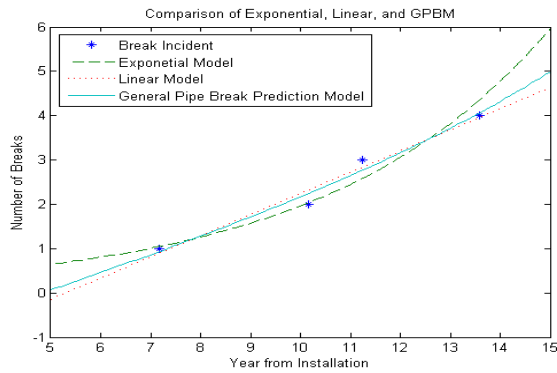


Fig. 7. Graphs of the Linear Model, Exponential Model and GPBM for the Pipe ID-32

사회적 보수비용은 관로 파손 보수비용의 0%, 100%, 500%, 1000%, 5000%, 10000% 비율로 한계파손율의 보수비용에 추가하여 각 관로 ID에 대한 최적교체시기를 산정하였다. 이러한 GPBM의 곡선접합계수, 가중계수 및 최적교체시기 산정 등의 일련의 과정을 분석하였다.

5.2. GPBM을 이용한 최적교체시기 산정

GPBM을 이용하여 각 관로 ID에 대해 사회적 보수비용 비율에 따른 최적교체시기를 Table 6과 같이 산정하였다. Table 6에서 가중계수가 0인 관로 ID 1, 8, 11, 16, 23, 39은 사회적 보수비용 비율에 따른 최적교체시기가 'inf'(infinity)의 형태로 나타났다. 이러한 관로들

은 GPBM의 가중계수가 '0'인 관로들로 파손경향이 선형으로 모호화된 경우들이며, 따라서 이러한 경우 관로의 현재의 파손율이 한계파괴율 보다 작은 관로들은 이론적으로는 한계파손율에 영원히 도달하지 않는 것을 나타낸다. 한편, 대수-선형 ROCOF는 최적교체시기가 무한대가 되는 극단적인 결과를 보이지는 않는다는 것을 Table 3을 통해 알 수 있다.

또한 Table 6에서 관로 ID 13, 14, 19, 27, 31, 37은 사회적 보수비용 비율에 따라 최적교체시기가 매설시기 이전으로 산정되었다. 이것은 ROCOF에 대한 경우와 마찬가지로 GPBM으로 산정되는 관로의 매설 이후의 모든 시간에서의 파손율이 그 관로의 한계파괴율 보다 크게 산정되었기 때문이다. 따라서 사회적 비용에 따라 최적교체시기가 매설시점 이전으로 산정될 경우 이러한 관로들은 이미 경제적 교체시기를 지난 상태이므로 사회적 비용을 고려한다면 분석 대상 시점에서 지체 없이 교체되는 것이 총 유지관리 비용을 절약하는 방안이 될 것으로 분석된다.

한편 Table 6에서 관찰되듯이 일부 관로는 그 최적 교체시기가 허수로 산정되었다. 최적교체시기가 허수로 산정되는 이유는 Eq. (9)에서 $\ln(A)$ 의 형태로 계산되는 부분 중 A의 값이 (-) 값을 가지기 때문이다. 따라서 이렇게 최적교체시기가 허수로 산정될 수도 있는 것은 GPBM의 또 다른 약점이라고 할 수 있다.

Table 6. Economically optimal replacement times of the pipe IDs based on the GPBM

Pipe ID	installation time	s=0	s=1	s=5	s=10	s=50	s=100
1	1975	inf	inf	inf	inf	inf	inf
3	1976	2020.7	2013.6	1997.8	imaginary number	imaginary number	imaginary number
5	1976	2008.8	1999.1	1983.5	1974.7	1950.3	1935.1
8	1964	inf	inf	inf	inf	inf	inf
11	1977	inf	inf	inf	inf	inf	inf
13	1977	1976.1	1967.5	1955.8	1950.6	1940.9	1937.8
14	1977	1983.1	1976.9	1967.9	1963.6	1955.2	1952.5
16	1977	inf	inf	inf	inf	inf	inf
19	1977	1977.6	1975.5	1972.7	1971.5	1969.3	1968.5
23	1966	inf	inf	inf	inf	inf	inf
25	1966	2063.0	2054.7	2039.6	2027.9	imaginary number	imaginary number
27	1991	2000.8	1999.8	1998.3	1997.5	1995.7	1995.1
31	1974	1974.4	1971	1966.5	1964.5	1960.7	1959.4
32	1974	imaginary number	imaginary number	imaginary number	imaginary number	imaginary number	imaginary number
34	1974	imaginary number	imaginary number	imaginary number	imaginary number	imaginary number	imaginary number
37	1974	1988.2	1984.7	1979.2	1976.2	1969.3	1966.6
39	1968	inf	inf	inf	inf	inf	inf

s : Social costs(100%)

연구대상 관로들의 파손경향을 ROCOF와 GPBM으로 모형화하여 최적교체시기를 산정한 결과가 큰 차이를 보이는 관로들이 있는데, 이와 같이 관로에 따라 분석 결과에 큰 차이를 보이는 경우에는 다음과 같은 모형의 적용 방안을 고려해 볼 수 있을 것으로 사료된다. 먼저 관로의 ROCOF가 와이블 ROCOF로 추정되었을 경우 이 관로의 파손 경향은 파손율이 낮아지고 있는 Burn-In Phase에 있을 경우로 추정된다. 따라서 이러한 관로는 파손율이 확실히 증가하는 경향을 보이기 전까지는 교체를 미루는 것이 보다 합리적일 것으로 사료된다. GPBM은 관로의 파손경향이 직선으로 모형화될 경우 최적교체시기가 무한대로 산정되는 단점이 있으므로, 일반적으로 GPBM보다는 대수-선형 ROCOF를 이용하는 것이 합리적일 것으로 사료된다. 그러나 관로 ID-27과 같이 GPBM과 대수-선형 ROCOF로 산정된 최적교체시기가 비교적 비슷한 경향을 보이는 관로도 발생할 수 있으므로 대수-선형 ROCOF로 모형화되는 관로들은 GPBM으로도 모형화하고 두 모형의 결과를 비교하여 GPBM과 대수-선형 모형에 의한 최적교체시기 중 현장 여건에 부합하는 교체시기를 관로 교체를 위한 의사결정에 참조하는 것이 합리적일 것으로 사료된다. 한편 이러한 최적교체시기를 산정하는데 있어서 관로의 파손으로 인한 간접(사회적) 비용도 매우 큰 역할을 하는데 이러한 사회적 비용도 관로의 특성과 관로에 연결되는 수용가의 특성에 적합하게 합리적으로 산정되어야 하며, 관로 파손으로 인한 사회적 비용을 산정하기 위한 과학적 방법론에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 관로의 경제적 유지관리를 위하여 관로의 파손 경향을 고려한 새로운 관로 ID 정의 방법을 개발하였으며, 이를 이용하여 연구대상 관망에 대해 관로 ID 부여를 위한 적절한 관로 최소구성성분 길이를 결정하였다. 연구대상 관망에 대해 관로 ID를 정의한 후 각 관로 ID의 파손율을 ROCOF 및 GPBM로 모형화하고 최적교체시기를 산정한 후 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가정된 관로최소구성성분 길이 중 4m에 대한 누적파손횟수경사선의 경사의 분산이 가장 크므로 연구대상 지역의 관로 ID 구분을 위한 관로최소구성성분 길이를 4 m로 결정하였고 관로 ID는 39개로 구분되어졌다.
- 2) 최적교체시기가 매설시기 이전으로 분석되는 관로

들은 관로의 기록된 자료에 따른 파손율이 한계 파손율에 비해 높은 관로들이므로 계산에 사용된 사회적 비용을 고려한다면 분석 대상 시점에서 지체 없이 교체되는 것이 총 유지관리 비용을 절감하는 방안이 될 것으로 사료된다.

- 3) 와이블 ROCOF 가 더욱 적합한 관로는 육조형 곡선과 비교 시 관로가 Burn-in Phase에 존재하는 것으로 판단됨에 따라 관로의 최적교체시기 결정은 향후 발생하는 파손 경향을 고려하여 결정되어야 할 것으로 사료된다.
- 4) GPBM은 관로의 파손경향이 직선으로 모형화될 경우 최적교체시기가 무한대로 산정되고, 경우에 따라 최적교체시기가 허수로 산정되는 단점이 있다.
- 5) 대수-선형 ROCOF로 모형화되는 관로들은 GPBM으로도 모형화하고 두 모형의 결과를 비교하여 GPBM과 대수-선형 모형에 의한 최적교체시기 중 실무 여건에 부합하는 교체시기를 관로 교체를 위한 의사결정에 참조하는 것이 합리적일 것으로 사료된다.
- 6) 최적교체시기를 산정하는데 있어서 관로의 파손으로 인한 간접(사회적) 비용도 매우 큰 역할을 하는데 이러한 사회적 비용도 관로의 특성과 관로에 연결되는 수용가의 특성에 적합하게 합리적으로 산정되어야 하며, 관로 파손으로 인한 사회적 비용을 산정하기 위한 과학적 방법론에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

본 연구에서 적용한 ROCOF 및 GPBM 모형화를 이용한 관로의 최적교체시기 산정 방법론을 널리 적용하기 위해서는 관로 파손자료를 지금보다 더욱 체계적이고 정확하게 관리해야하고 이러한 관로 파손자료를 기존에 구축된 GIS/UIS 시스템과 연계하여 이용할 경우 상수관로를 보다 효율적이고 체계적으로 유지관리 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 김용석, 김중훈, 이현동 (2002). “상수관로의 노후도 영향인자 및 가중치 산정에 관한 연구.” **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제16권, 제6호, pp. 686-699.

- 이현동, 정원식, 안윤주 (2002). “국내 중소도시 상수도관의 파손특성 및 영향인자 분석에 관한 연구.” **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제16권, 제4호, pp. 383-388.
- 정원식, 이현동, 김이태, 유명진 (2003). “상수도관의 노후도에 대한 환경영향인자의 상관성 분석.” **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제17권, 제2호, pp. 242-249.
- 조지현, 조영하, 김남미, 최승필, (2000). “지형공간정보체계를 이용한 상수도시설물의 노후도 평가시스템 구축” **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제20권, 제7호, pp. 687-690,
- Clark, R.M., Stafford, CL. and Goodrich, J.A. (1982). “Water distribution systems: A spatial and cost evaluation.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 108, pp. 243-256.
- Cooper, N.R., Blakey, G., Sherwin, C., Ta, T., Whiter, J.T. and Woodward, C.A. (2000). “The use of GIS to develop a probability-based trunk mains burst risk model.” *Urban Water*, Vol. 2, pp. 97-103.
- Crowder, M.J., Kimber, A.C., Smith, R.L., and Sweeting, T.J. (1991). *Statistical Analysis of Reliability Data*, Chapman and Hall, London, pp. 164-174.
- Kettler, A. J. and Goulter, I. C.(1985). “An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks.” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, pp. 286-293.
- Kleiner, Y. and Rajani, B.(2001). “Comprehensive review of structural deterioration of water mains : statistical models.” *Urban Water*, Vol. 3, pp. 131-150.
- Loganathan, G. V., S. Park, and H. D. Serali (2002). “Threshold Break Rate for Pipeline Replacement in Water Distribution Systems.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 4, pp. 271-279.
- Park, S., Jun, H.D., and Kim, J.W. (2007). “Modeling of Rate-of-Occurrence-of-Failure According to the Failure Data Type of Water Distribution Cast Iron Pipes and Estimation of Optimal Replacement Time Using the Modified Time Scale.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 39-50.
- Park, S. and Loganathan, G.V. (2002). “Methodology for Economically Optimal Replacement of Pipes in Water Distribution Systems : 1. Theory.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 539-543.
- Park, S. and Loganathan, G.V. (2002). “Methodology for Economically Optimal Replacement of Pipes in Water Distribution Systems : 2. Applications.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 545-550.
- 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.
- Shamir, U. and Howard, C.D.D. (1979). “An analytic approach to scheduling pipe replacement.” *Journal of American Water Works Association*, Vol. 71, No. 5, pp. 248-258.
- Walski, T. M. and Pelliccia, A.(1982). “Economic analysis of water main breaks.” *Journal of American Water Works Association*, Vol. 74, No. 3, pp. 140-147.

(논문번호:09-011/접수:2009.01.22/심사완료:2009.06.08)