



대구경 상수도관로의 경제적수명 산정 연구: P상수도 사례연구

A study on the economical life of large-diameter water pipe: case study in P waterworks

김기범¹·서지원¹·최태호²·구자용^{1*}
Kibum Kim¹·Jeewon Seo¹·Taeho Choi²·Jayong Koo^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학과, ²한국수자원공사
¹Environmental Engineering, University of Seoul. ²K-water

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

ABSTRACT

This study develops a model to estimate the economic life of the large-diameter water supply pipeline in Korea by supplementing existing methods used to perform similar calculations. To evaluate the developed methodology, the model was applied to the actual target area with the conveyance pipe in P waterworks. The application yielded an economic life computation of 39.7 years, considering the cost of damages, maintenance, and renewal of the pipeline. Based on a sensitivity analysis of the derived results, the most important factor influencing the economic life expectancy was the predicted failure rate. The methodology for estimating the economic life of the water supply pipeline proposed in this study is one of the core processes of basic waterworks facility management planning. Therefore, the methods and results proposed in this study may be applied to asset management planning for water service providers.

Key words: Economic life, Failure rate prediction, Optimal renewal period, Water pipe

주제어: 경제적 수명, 파손율 예측, 최적 개량시기, 상수도관

1. 서 론

상수도관의 노후화 및 내구연수 산정과 관련된 선행연구들을 살펴보았을 때, 급속한 경제성장에 발맞추어 1970년 이후 집중적으로 매설된 대한민국의 상수도는 현재 노후화가 가속화되는 시점이라고 판단할 수 있다. 그 중 공급과정의 상단부에 위치한 도·송수관로는 대구경 관로로써, 노후화에 따른 피해가 크게 나타나므로 노후된 관로의 누적을 사전에 예방할 필요가 있다. 그러나 지방공기업법 시행규칙에 따라 상수도관로의 내용연수를 30년이라 하면, 2016년 말을

기준으로 우리나라에 매설된 도·송수관로 9,356 km 중 내용연수를 경과하여 즉시 교체가 필요한 경년관은 1,374 km로 전체 중 14.69%에 달하고 있는 것으로 나타났다(MOE, 2016). 만약 현재까지 누적되어 있는 경년관이 개량되지 않는다면, 향후 10년 이내에 개량 대상이 되는 관로는 3,946 km로 급증할 것으로 예상된다. 다만, 이와 같은 분석 결과는 상수도관로의 물리적 수명(Physical life) 또는 경제적 수명(Economical life)을 고려하지 않고 회계적 수명(Fiscal life)만을 고려한 것이므로, 실제 상수도관로의 수명을 고려할 시에는 이와 같은 분석 결과는 달라질 수 있다.

상수도관로의 물리적 수명을 산정하기 위해서는 진단·평가를 실시하여야 한다. 그러나 모든 관로에 대하여

Received 22 December 2017, revised 29 January 2018, accepted 31 January 2018

*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

진단·평가를 실시하고 이를 데이터베이스화하기 위해서는 상당한 시간과 비용을 소요하여야 한다. 이에 상대적으로 간편한 방법인 상수도관로의 과거 파손이력 자료를 바탕으로 경제적 수명을 산정한 뒤, 경제적 관점에서 개량시기를 가늠하기 위한 연구들이 다수 이루어졌다. 상수도관로의 경제적 수명을 산정하기 위한 선행 연구들은 다음과 같다.

Shamir and Howard (1979)는 상수도관로 개량에 소요되는 비용과 유지관리에 소요되는 비용 사이의 최적화(Dynamic optimization) 문제를 해결하여 최적 개량시기를 결정하는 과정에 대한 표준 모형을 제안한 바 있다. 제안한 모형은 다양한 연구에서 다수 활용된 바 있으며, 파손 함수($N(t)$)로써 어떤 함수를 사용하는지에 따라 다양한 결과가 도출될 수 있다.

파손 함수로 지수형태의 함수를 사용한 연구는 Shamir and Howard (1979), Walski (1987) 등이 있으며, Park and Loganathan (2002)는 지수함수와 선형함수를 결합한 함수를 사용하기도 하였다. Herz (1996)는 Cohort survival model을 이용하여 비선형 형태의 파손 함수를 제안하였으며, Kim et al. (2014)은 대구경 상수도관로의 파손율을 Cohort survival model의 failure function을 이용하여 도출한 바 있다. 한편, 수량화 분석과 같은 기존에 사용되지 않았던 방법을 활용하여 파손함수를 도출한 사례도 있다 (Kim et al., 2016; Arai et al., 2010).

상수도관로의 파손을 예측하기 위한 방법으로 확률적인 모델을 이용한 연구들은 다음과 같다. Hong et al. (2006)은 포아송 분포를 활용하여 상수도관의 장래 파손 확률을 예측하였으며, Pelletier et al., (2003), Christodoulou (2011)은 각각 Cox 비례위험모형, Weibull 비례위험모형을 이용하는 방법론을 제안하였다. Watson et al. (2004)과 Wang et al. (2010)은 베이지안 확률 통계법을 이용하여 상수도관로의 상태평가를 수행하고 장래 파손확률을 예측하였다.

노후된 대구경 상수도관로의 교체에 소요되는 비용을 효율적·합리적으로 투자하기 위해서는 상수도관로의 수명에 기반하여 언제 투자가 이루어져야 하는지를 경제적, 공학적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 Shamir and Howard (1979)가 제안한 방법론을 기반으로 우리나라 대구경 상수도관로의 경제적 수명을 산정할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다. 이를 통해 노후 상수도를 언제 개량하는 것이 경

제적인 관점에서 가장 합리적인지를 판단하고자 하였다. 또한 실제 개량이 필요한 관로를 대상으로 사례연구를 진행함으로써, 개발한 모델의 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 상수도관로의 경제적 수명 산정 방법

Shamir and Howard (1979)와 US EPA (2012)는 상수도관 파손의 파급영향을 나타내는 리스크 피해비용과 개량 비용의 합이 최소화되는 시기를 노후 상수도관의 최적 개량시기로 제안한 바 있다. 제안한 방법론은 상수도관의 경제적인 수명을 도출하기 위한 방법으로 정의할 수 있다. 다만, 제안한 방법론은 상수도관로의 유지관리를 위해 통상적으로 사용하고 있는 유지관리 비용은 고려하지 않은 것으로서, 단순하게 관로 파손에 의해 발생하는 피해비용과 개량에 소요되는 비용만의 함수로 표현된다. 이에 본 연구에서는 기존에 제안된 관로 파손에 의해 발생하는 피해비용함수를 더욱 구체적으로 정량화하고, 유지관리를 위해 매년 소요되는 비용을 추가적으로 고려하여 후술된 방법론에 따라 상수도관로의 경제적 수명을 산정하였다.

상수도관로의 경제적 수명, 즉, 경제적 관점의 최적 개량시기란, 관로의 노후에 따라 발생하는 파손에 따른 피해비용을 포함한 유지관리비용(P_m)과 관로의 개량 비용(P_r)의 합으로 표시되는 관로 개량의 총비용(P_T)을 극소화하는 개량시점(t_r^*)을 택하는 것이다. 이는 식 (1)에 정리된 최적화 문제의 해를 구하는 것과 같다.

$$\text{Minimize } P_T(t_r) = P_m(t_r) + P_r(t_r) \quad (1)$$

$P_T(t_r)$: 개량시점(t_r)까지 발생하는 유지관리비용과 개량시점(t_r)에 소요되는 개량비용의 합(관로 개량까지 소요되는 총 비용)의 현재가치

$P_m(t_r)$: 개량시점(t_r)까지 발생하는 관로 파손에 따른 피해비용을 포함한 유지관리비용의 현재가치

$P_r(t_r)$: 개량시점(t_r)에 소요되는 개량비용의 현재가치

여기서, $P_r(t_r)$ 은 관로개량 시기를 t_r 로 정하는 것에 따라 소요되는 관로의 개량비용으로써 노후관로를 새 관로로 개량하는 데 소요되는 비용의 현재가치를



나타낸다. 관로의 개량비용($P_r(t)$)은 개량시점(t_r)에 대한 감소함수가 될 것이다. 이는 노후 상수도관로의 개량이 늦춰질수록 현재가치로 측정되는 개량비용은 감소할 것이기 때문이다. 관로의 개량비용($P_r(t)$)은 현 시점의 개량비용(C_r)에 물가상승을 고려하여 산정할 수 있다. 관로의 개량시점(t_r)에 관로를 신규 관로로 개량하는 데 소요되는 비용의 현재가치는 식 (2)와 같다.

$$P_r(t_r) = \frac{C_r(1+i)^{t_r-t_p}}{(1+R)^{t_r-t_p}} \quad (2)$$

- $C_r(t_r)$: 현 시점에서 관로 개량시점(t_r)에 소요되는 개량비용
- R : 사회적 할인율
- i : 물가상승률
- t_p : 현재시점

$P_m(t_r)$ 은 관로개량 시기를 t_r 로 정하는 것에 따라 소요되는 현재(t_p)부터 관로개량 시점(t_r)까지 소요되는 상수도관로 파손에 따른 피해비용과 유지관리비용을 현재가치로 환산한 것을 의미한다. 최적 관로개량시점(t_r^*)을 선택하는 최적화 문제를 푸는 경우 시간 변수(t)는 연속적 변수이나, 연간 자료를 이용하는 경우, 시간 변수(t)는 정수 값을 갖는 이산적 변수로 볼 수 있다. 각 년도에서 관로 파손이 1회 발생할 시, 파손에 따른 피해비용은 C_d 를 기준으로 물가상승률에 따라서만 변화된다고 가정하고, 상수도관로 관로 연령에 따른 유지관리를 위한 비용을 추가로 고려할 시, 상수도관로 유지관리비용($P_m(t_r)$)은 현재시점(t_p)부터 개량시점(t_r) 사이 기간의 누적비용으로 표현할 수 있다. 여기서, 노후 상수도관로의 개량시기가 지연될수록 피해비용과 유지관리비용은 증가할 것이므로, 유지관리비용($P_m(t)$)은 개량시점(t_r)의 증가함수가 될 것이다.

$$P_m(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_d \times (1+i)^{t_r-t_p} \times N(t_a) + C_m(t_a) \times (1+i)^{t_r-t_p}}{(1+R)^{t_r-t_p}} \quad (3)$$

- C_d : 관로 파손 1회 발생시 발생하는 피해비용
- $C_m(t_a)$: 상수도관로 연령에 따른 연간 상수도관로 유지관리 비용

$N(t_a)$: 상수도관로 연령에 따른 연간 파손 발생률
 t_a : 관 연령 ($t_a = t - t_0$, t_0 : 관로 매설연도)

식 (3)에 나타난 $N(t_a)$ 는 관 연령에 따른 1년 간 단위 관로길이당 관로 파손 횟수를 나타낸다. 우리나라의 대구경 상수도관로를 대상으로 실제 파손 이력과 예측된 파손율과의 상관성을 분석한 결과 다양한 파손율 예측 함수 중 Cohort survival model의 failure rate function이 가장 상관성이 높다는 결과가 도출된 바 있다 (K-water, 2014).

따라서 본 연구에서는 우리나라의 대구경 상수도관로에 가장 적합한 추세를 나타내는 다음 식 (4)와 같은 형태의 파손율 예측 모델을 적용하였으며, 식 (4)의 계수는 Curve fitting법을 이용하여 도출하였다.

$$N(t_a) = \frac{b \cdot e^{b((t-t_0)-c)}}{a + e^{b((t-t_0)-c)}} \quad (4)$$

- a, b : 노후속도를 결정하는 인자
- c : 지체시간

노후 상수도관로의 최적 개량시기는 다음과 같은 최적화문제의 1계 필요조건(First order necessary conditions)에 의하여 결정할 수 있다. 식 (2), (3), (4)를 식 (1)에 대입하여 비용극소화 문제를 다시 설정하면, 다음 식 (5)와 같은 수식을 도출할 수 있으며, 식 (5)를 선택변수 t_r 에 관하여 미분한 값을 0으로 하는 t_r 을 구하면 다음 식 (6) 및 식 (7)과 같은 1계 필요조건을 구할 수 있다.

$$\text{Minimize } P_T(t_r) = \quad (5)$$

$$\sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_d \times N(t_a) + C_m(t_a)}{\left(\frac{1+R}{1+i}\right)^{t_r-t_p}} + \frac{C_r}{\left(\frac{1+R}{1+i}\right)^{t_r-t_p}}$$

$$\frac{dP_T}{dt} = \quad (6)$$

$$\frac{C_d \cdot N(t_r) + C_m(t_r) - C_r \cdot \ln\left(\frac{1+R}{1+i}\right)}{\left(\frac{1+R}{1+i}\right)^{t_r-t_p}} = 0$$

$$N(t_r) = \frac{C_r \cdot \ln\left(\frac{1+R}{1+i}\right) - C_m(t_r)}{C_d} \quad (7)$$

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

식 (4)와 식 (7)을 풀면 식 (8)과 같은 형태의 최적 개량시기를 산정할 수 있으며, 최적 개량시기와 관로 매설연도를 통해 다음 식 (9)와 같이 상수도관로의 경제적 수명을 도출할 수 있다.

$$t_r^* = \frac{1}{b} \ln \left[\frac{a \cdot \left(C_r \cdot \ln \left(\frac{1+R}{1+i} \right) - C_m(t_r) \right)}{C_d \cdot b - \left(C_r \cdot \ln \left(\frac{1+R}{1+i} \right) - C_m(t_r) \right)} \right] + t_0 + c \quad (8)$$

(단, $C_d \cdot b \geq C_r \cdot \ln \left(\frac{1+R}{1+i} \right) - C_m(t_r) \geq 0$)

$$t_e = t_r^* - t_0 \quad (9)$$

t_e : 상수도관로의 경제적 수명

2.2 관로 개량비용 및 유지관리비용 산정 방법

관로의 개량비용($P_r(t_r)$)은 Kim et al. (2014)이 상수도 관로 개량비용을 산정하기 위해 추정된 비용 산정 방법론을 동일하게 이용하였다. 세부적인 비용은 우리나라에서 상수도관로를 설계하고 시공할시 사용하는 표준품셈에 제시되어있는 자료를 활용하여 도출하였다.

식 (3)에 나타낸 상수도관로의 유지관리비용($P_m(t_r)$)을 산정하기 위해서는 관로 파손 1건에 대한 피해비용과 관 연령별 유지관리비용을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 관로 파손 1건에 대한 피해비용으로써, 식 (10)과 같이 7가지 비용항목(관로사고복구비용(C_{RC}), 가정용 생활용수단수피해비용(C_{DL}), 비가정용생활용수단수피해비용(C_{DC}), 누수피해비용(C_{WL}), 공업용수단수피해비용(C_{DI}), 교통체증비용(C_{TC}), 수질피해비용(C_{WQ}))을 고려하였다.

$$C_d = C_{RC} + C_{DL} + C_{DC} + C_{WL} + C_{DI} + C_{TC} + C_{WQ} \quad (10)$$

$$C_{RC} = RC$$

$$C_{DL} = WTP_D \times HH \div N_{ave}$$

$$C_{DC} = QN \times t_s \times (DC + WC)$$

$$C_{WL} = QL \times WC$$

$$C_{DI} = QI \times t_s \times V_{MP}$$

$$C_{TC} = t_{rr} \times TJC$$

$$C_{WQ} = WTP_Q \times D \div N_{ave}$$

RC : 관로파손시 복구비용(원)

WTP_D : 생활용수 단수피해를 막기 위해 소비자가 현재의 수도요금에서 추가로 지불하고자하는 지불의사액(원/가구/yr)

HH : 급수 가구수(가구)

N_{ave} : 대상관로 개량 전·후 연간 저감할 수 있는 평균 관로 파손 건수(건)

QN : 비가정용 생활용수 사용량(m^3/d)

t_s : 단수시간(h)

DC : 물차운영비용(원/ m^3)

WC : 수돗물 요금(원/ m^3)

QL : 관로파손시 누수량(m^3)

QI : 공업용수 사용량(m^3/d)

V_{MP} : 한계생산가치(원/h)

t_{rr} : 관로 파손 복구시간(h)

TJC : 교통체증비용(원/h)

WTP_Q : 수질악화를 막기 위해 소비자가 현재의 수도요금에서 추가로 지불하고자하는 지불의사액(원/ m^3)

D : 생활용수 공급량(m^3/d)

관 연령별 유지관리비용은 2007년부터 2015년까지 K-water에서 관리하고 있는 11개 관리단, 15개 광역상수도의 관로 평균 연령에 따른 유지관리비 원단위 회귀식을 도출한 뒤 적용하였다.

3. 사례연구 결과

3.1 사례연구 대상관로

사례연구대상지역은 우리나라의 P시로 선정하였으며, 연구대상관로는 P시의 도수관로로 선정하였다. 연구대상 P시의 도·송수관로는 매설한지 30년 이상 경과하고, 1980년 이후 2015년 말까지 36년간 99건의 파손이력이 있는 관로이다. 또한 2010년 정밀안전진단 결과, 관로의 내구성 및 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요한 상태인 C등급으로 평가되었으며, 2015년 기술진단 결과 갱생 및 교체가 필요한 등급으로 평가된 관로이다. Table 1과 Fig. 1은 사례연구 대상 상수도 전체의 현황과 P상수도 중 연구대상관로로 선정된 도수관로의 현황을 나타낸다.



Table 1. Current situation of target water supply

Category	Whole pipeline of P city water supply pipelines (Conveyance and transmission pipes)	Target pipeline
Installation year	1979	1979
Pipe type	SP(Steel pipe), DCIP(Ductile cast iron pipe), PCCP(Prestressed concrete cylinder pipe)	SP
Pipe diameter	1,000mm ~ 2,200mm	1,350mm
Pipe length	55.7km	18.9km
Supply area	2 City (P City, K City)	2 City (P City, K City)
Demand	169,000m ³	169,000m ³

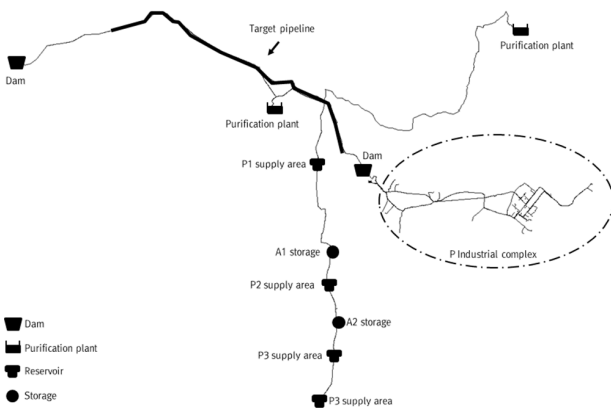


Fig. 1. Target water supply and target pipeline.

3.2 연구대상관로 파손율 예측 함수 개발 결과

연구대상 P상수도, 도수관로에서 발생한 파손에 대한 이력자료는 통계적으로 유의미한 모델 개발에 활용하기 어렵다고 판단하였다. 이에 본 연구에서는 연구대상관로가 SP인 점과 대구경 도수관로라는 점을 고려하여, 1963년 이후 2015년까지 전국에 매설된 광역상수도 중 관종이 SP인 2,810 km의 관로에서 발생한 566건의 파손 이력자료를 활용하여 파손율 예측 모델을 개발하였다.

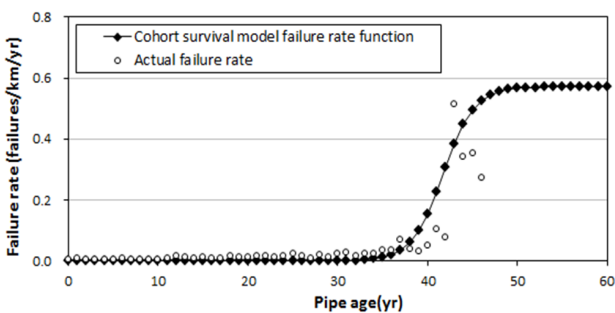


Fig. 2. Failure rate prediction model for SP.

다음 식 (11)은 파손율 예측 모델을 나타내며, 식 (11)의 계수들은 식 (8)에 적용하여 관로의 경제적 수명을 예측하는 것에 활용하였다. 모델식을 통해 도출된 예측 파손율과 실제 파손율 사이의 상관계수는 0.8045로 나타나 본 연구를 통해 개발한 파손율 예측 모델은 실제 파손율을 상당히 잘 모사하는 것으로 판단되었다.

$$N(t_a) = \frac{b \cdot e^{b((t-t_0)-c)}}{a + e^{b((t-t_0)-c)}} \quad (11)$$

$$= \frac{0.571 \cdot e^{0.571((t-t_0)-34.798)}}{52.114 + e^{0.571((t-t_0)-34.798)}}$$

3.3 연구대상지역 관로 개량비용 및 유지관리비용 산정 결과

관로의 개량비용($P_r(t)$)은 연구대상관로인 1,350 mm, SP, 18.9 km 전체를 개량하는 경우 발생하는 총비용을 관로 연장으로 나눈 값인 1,890백만 원/km를 적용하였다. 여기서 개량은 해당 관로를 신관로로 교체하는 것으로 가정하였다. 적용한 비용은 2016년 1월에 공사를 실시한다고 가정하는 경우의 비용을 나타내며, 2016년 이후부터는 물가상승률에 따라 공사비용이 증가하는 것으로 설정하였다.

대상관로에 파손이 1건 발생하는 경우에 대한 피해비용은 다음 Table 2와 같으며, 피해비용 산정을 위해 적용한 값들은 Table 3과 같으며, 선행연구 및 참고문헌들을 활용하여 대상지역에 가장 적합한 값을 적용하였다.

18.9 km의 대상관로를 개량하게 되면, 개량하지 않고 방치하는 경우에 비해 평균 9.48건/yr의 파손건수를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에 적용한

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

Table 2. Damage cost according to target pipeline failure

Damage cost item	Result of calculation (thousand KRW)
$C_{RC} = RC$	50,613
$C_{DL} = WTP_D \times HH \div N_{ave}$	81,624
$C_{DC} = QN \times t_s \times (DC + WC)$	0
$C_{WL} = QL \times WC$	283
$C_{DI} = QI \times t_s \times V_{MP}$	0
$C_{TC} = t_{rr} \times TJC$	6,794
$C_{WQ} = WTP_Q \times D \div N_{ave}$	170,223

소비자 지불의사액은 관로를 개량하여 안정적으로 급수를 받고, 안전한 수질의 수도물을 공급받게 된다면, 단수피해방지를 위해 666.6원/가구/월, 수질피해방지를 위해 45.8원/m³의 지불의사가 있다는 것을 의미한다. 즉, 연간 소비자들이 지불하고자 하는 의사액을 통해 산정된 단수피해방지비용 및 수질피해방지비용은 곧 9.48건/yr의 파손이 발생하지 않도록 하기 위한 금액으로 간주할 수 있다. 이를 고려하여 관로 파손 1건당 피해비용을 산정하였으며, 이에 따라 파손 1건당 생활용수단수피해비용(C_{DL})은 81,624천원, 파손 1건당 수질피해비용(C_{WQ})은 170,223천원으로 산정되었다.

Table 3. Applied value for calculating damage cost

Item	Application	Unit	Reference
RC	50,613	thousand KRW	K-water (2014)
WTP_D	666.6	KRW/household/month	MOLIT (2014a)
N_{ave}	9.48	failure/yr	Calculation
HH	96,734	number of household (in 2025)	MOLIT (2015)
QN	70,249	m ³ /d (in 2025)	MOLIT (2015)
t_s	0	h	Result of hydraulic analysis
DC	12.2	thousand KRW/m ³	K-water (2014)
WC	737.62	KRW/m ³	MOE (2016)
QL	384	m ³ (in SP, 1,350 mm)	Kim et al. (2014)
QI	170,070	m ³ /d (in 2025)	MOLIT (2015)
V_{MP}	9,948	KRW/m ³	KDI (2008)
t_{rr}	29	h	MOLIT (2014)
TJC	234	thousand KRW	MOLIT (2014b), KOTI (2012)
WTP_Q	45.8	KRW/m ³	MOLIT (2014)
D	96,468	m ³ /d (in 2025)	MOLIT (2015)

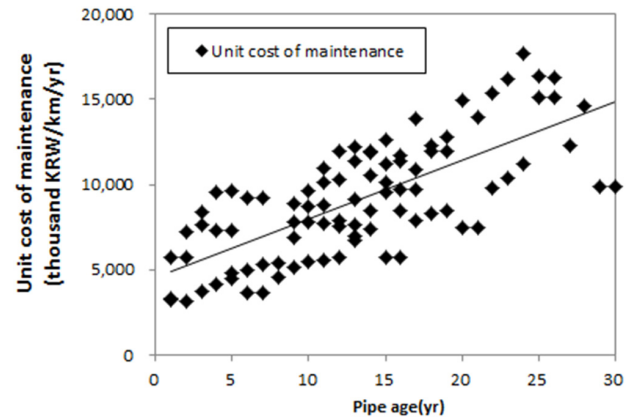


Fig. 3. Unit cost of maintenance by pipe age.

Table 2에서 알 수 있듯이, 대상관로에서 파손이 발생하여도, 비가정용생활용수피해비용(C_{DC})과 공업용수피해비용(C_{DI})은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 1에 나타난 연구대상지역에 특성과 관련된 것으로, 연구대상지역은 P 산업단지에서 단수가 발생하는 것을 고려하여 도·송수과정 중간에 저류지가 설치되어 있다. 저류지의 보유수량과 P 산업단지 내에 각 단지마다 설치된 저류조 보유수량은 상시 대상관로가 파손되어 복구하는데 소요되는 시간(t_{rr})인 29시간이상인 것으로 조사되어, 단수에 따른 피해는 발생하지 않는 것으로 나타났다.



다음으로 관 연령에 따른 유지관리비용($C_m(t_a)$)을 도출한 결과는 식 (12) 및 Fig 3과 같다. 실제 15개 광역상수도에서 지출한 유지관리비 원단위와 관 연령별 유지관리비 원단위 예측값 사이의 상관계수는 0.7276으로 나타나, 예측값은 실제값을 잘 모사할 수 있는 것으로 판단하였다.

$$C_m(t_a) = 344.52t_a + 4,537.80 \quad (12)$$

$C_m(t_a)$: 관 연령별 유지관리비 원단위(1,000원/km/yr)

3.4 연구대상관로 경제적 수명 도출 결과

연구대상관로인 P광역상수도 도수관로에 대해 최적 개량시점 및 경제적 수명을 도출한 결과는 다음과 같다. 앞서 제시한 식 (8)에 포함된 사회적할인율로는 5.5%를, 물가상승률로는 2.2%를 적용하였다. 식 (13)에서 알 수 있듯이, 우변에 개량시점(t_r)에 따라 좌변의 최적 개량시점(t_r^*)이 결정되게 된다.

즉, 반복계산을 통해 식 (13)의 좌변과 우변의 차이를 최소화하는 개량시점(t_r)이 곧 최적 개량시점(t_r^*)이라 정의할 수 있다. 본 연구에서는 Microsoft Excel에서 제공하는 Solver 기능을 이용하여 식 (13)의 좌변과 우변의 차이를 최소화하는 최적해, 즉 최적 개량시점(t_r^*)을 도출하였다.

$$t_r^* = \frac{1}{(0.571)} \ln \left| \frac{(52.114) \cdot (1,890) \cdot \ln\left(\frac{1.055}{1.022}\right) - \left(\frac{344.52 \cdot t_r + 4,537.80}{1,000}\right)}{(309.54) \cdot (0.571) - \left((1,890) \cdot \ln\left(\frac{1.055}{1.022}\right) - \left(\frac{344.52 \cdot t_r + 4,537.80}{1,000}\right)\right)} \right| + 1979 + 34.793 \quad (13)$$

연구대상관로의 최적 개량시점(t_r^*)은 2018.7년으로 나타났다. 결과적으로 1979년에 매설된 연구대상관로의, 관로 파손에 따른 피해비용과 유지관리비용, 개량비용을 종합적으로 고려한 경제적 수명은 39.7년으로 나타났다.

3.5 민감도 분석 결과

식 (8)과 식 (9)에 나타난 바와 같이 경제적 수명을 산정하기 위해 다양한 인자를 고려하였다. 특히, 식 (11)과 Fig. 2에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 사용한 관로

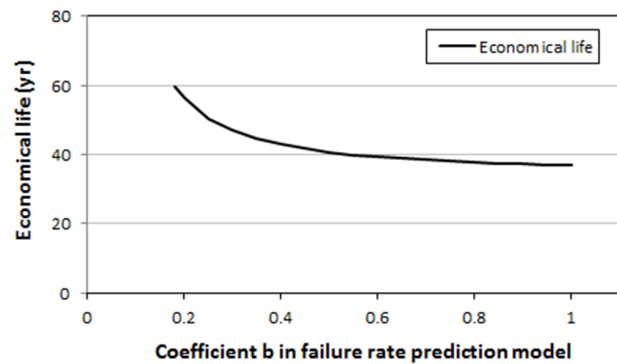


Fig. 4. Result of sensitivity analysis about converged failure rate.

파손을 예측 모델인 Cohort survival model의 failure function은 일정시간이 경과한 후 특정 파손율에 수렴하는 결과를 나타낸다. 다음 Fig 4는 파손율 수렴값(식 (4)의 b)에 따라 연구대상관로의 경제적 수명이 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 파손율 수렴값이 0.2건/km/yr인 경우 연구대상관로의 경제적 수명은 56.3년으로 나타났으며, 파손율 수렴값이 0.9건/km/yr인 경우 경제적 수명은 37.3년으로 나타났다.

파손율 수렴값이 클수록 관로의 경제적 수명은 낮아지는 것으로 나타났다. 여기서, 파손율 수렴값이 크다는 것은 과거 파손이 많이 발생했다는 것을 의미한다. 이를 달리 해석하면, 상수도관로에 대한 유지관리 기술의

고도화를 통해 발생할 것으로 예상되는 파손건수를 줄여간다면, 상수도관로의 경제적 수명을 증가시킬 수 있음을 의미한다.

한편, 사회적할인율(R)과 물가상승률(i)의 변화에 따른 민감도 분석 결과는 Table 4와 같다. 경제적 수명은 사회적할인율(R)이 높을수록, 물가상승률(i)이 낮을수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 사회적할인율(R)이 낮을수록, 물가상승률(i)이 높을수록 장래에 발생하는 비용의 현재가치가 증가하기 때문이다. 현재가치가 증가한다는 것은 상수도관로의 개량을 위해 지불해야하는 금액이 증가함을 의미한다.

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

Table 4. Result of sensitivity analysis about social discount rate and inflation rate

Social discount rate (%) (Inflation rate = 2.2 %)	Economical life (yr)	Inflation rate (%) (Social discount rate = 5.5 %)	Economical life (yr)
0.035	36.11	0.010	40.72
0.040	37.62	0.015	40.31
0.045	38.50	0.020	39.86
0.050	39.14	0.025	39.36
0.055	39.67	0.030	38.75
0.060	40.12	0.035	37.96
0.065	40.52	0.040	36.76
0.070	40.90	0.045	33.74

Table 5. Result of sensitivity analysis about cost changes

Changes (%)	Economical life (yr)		
	Cr	Cd	Cm
-20	38.94	40.19	39.86
-10	39.33	39.91	39.76
0	39.67	39.67	39.67
10	39.98	39.46	39.57
20	40.26	39.27	39.47

다음 Table 5는 개량에 소요되는 비용(C_r), 관 파손 발생시 피해비용(C_d), 관 연령에 따른 유지관리비용(C_m)이 현재 값에서 -20~20% 사이로 변동될 때를 모의하여 민감도 분석을 실시한 결과를 나타낸다. 해당 인자들의 변화는 경제적 수명에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 개량에 소요되는 비용이 증가할수록 경제적 수명은 작아지나 그 폭은 상당히 미미한 것으로 나타났다. 반면 관 파손에 따른 피해비용과 유지관리비용이 증가할 시 경제적 수명이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 유지관리를 위해 소요되는 비용이 클수록 관로를 일찍 교체하는 것이 경제적이라는 의미이다. 다만 피해비용과 유지관리비용이 20% 저감된 경우와 20% 증가된 경우 사이의 경제적 수명 편차는 1년 미만으로써, 크지 않은 것으로 나타났다.

민감도 분석 결과는 과거 관로의 파손 이력자료를 통해 도출된 관로 파손율 예측모델이 상수도관로의 경제적 수명을 결정하는 가장 주요한 인자라고 해석할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 연구대상지역 관로의 파손 이력자료가 통계적으로 유의미한 해석이 가능한 표본수를 확보하지 못한다고 판단하여, 전국 광역상수도를 대상으로 개발한 파손율 예측 모델을 적

용하였다. 더욱 정확하게 상수도관로의 경제적 수명을 도출하기 위해서는 연구대상지역의 자료를 토대로, 연구대상지역에 가장 적합한 파손율 예측 모델을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 대구경 상수도관로의 경제적 수명을 산정하여 노후된 대구경 상수도를 언제 개량하는 것이 경제적인 관점에서 가장 합리적인지를 판단할 수 있는 모델을 개발하였다. 개발한 모델은 기존에 제안된 방법론을 더욱 구체화한 것으로서, 현장에서 충분히 적용하여 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

개발한 모델을 P상수도 도수관로를 대상으로 적용한 결과, 대상관로의 관로 파손에 따른 피해비용과 유지관리비용, 개량비용을 종합적으로 고려한 경제적 수명은 39.7년으로 나타났다.

도출된 결과에 대한 민감도 분석을 실시한 결과, 경제적 수명 산정에 주요한 영향인자는 관로 파손율 예측 결과로 나타났다. 다만, 본 연구에서 적용한 관로 파손율 예측 모델은 전국 광역상수도 자료를 활용하여 도출된 모델로써, 전국 평균 모델이라 할 수 있다. 추후 연구대상지역만의 자료가 축적되어 통계적 의미를 지닐 수 있는 표본수를 확보할 경우 연구대상지역에 가장 적합한 파손율 예측 모델을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

한편, 본 연구에서는 가정용 생활용수단수피해비용을 산정하기 위하여 조건부가치평가법을 사용하는 방법론을 활용하였다. 가정용 생활용수단수피해비용의



경우 단수시간동안 필요한 먹는 샘물 구매 비용을 피해비용으로 간주하는 대체비용법 등을 사용할 수도 있을 것이라 판단된다. 다만, 어떤 방법론을 적용하는 것이 더 합리적인지는 연구대상지역의 특성에 따라 달라지는 것으로써, 추후 다른 연구대상지역, 다른 연구대상관로의 경제적 수명을 도출하고자 할 시에는 대상지역의 특성에 더 합리적인 방법론을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

끝으로, 본 연구에서 제안한 상수도관로의 경제적 수명을 산정하기 위한 방법론은 개량 우선순위 산정, 연차별 개량 계획 수립 등에 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 개량 계획의 수립은 상수도시설 자산관리 기본계획의 핵심이 되는 절차 중 하나로, 본 연구의 결과물은 추후 상수도시설 자산관리 기본계획 수립시 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

References

- Arai, Y., Koizumi, A., Umamo, H., Ashida, H., Ozaki, M., and Yoshida, E. (2009). Statistical analysis of the corrosion of water distribution pipes under their environmental factors, *J. Jpn. Soc. Civ. Eng. Environ. Syst. Res*, 37 (37), 9-17.
- Christodoulou, S. (2011). Water network assessment and reliability analysis by use of survival analysis, *Water Resour. Manag.*, 25 (4), 1229-1238.
- Herz, R. K. (1996). Ageing process and rehabilitation needs of drinking water distribution networks, *J. Water Supply Res. T.*, 45 (5), 221-231.
- Hong, H. P., Allouche, E. N. and Trivedi, M. (2006). Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems, *J. Infrastruct. Syst.*, 12 (3), 184-191.
- KDI(Korea Development Institute), (2008). General Guidelines for Conducting Preliminary Feasibility Research (4th edition), pp.107.
- Kim, K., Kim, M., Choi, S. and Koo, J. (2014). A study on economic evaluation for pipeline renewal using contingent valuation method and forecasting future pipeline burst, *Procedia Eng.*, 89, 870-877.
- Kim, K., Kim, M., Seo, J. and Koo, J. (2016). Renewal prioritization of multi-regional water supply pipelines through water supply risk assessment, *Water Sci. Technol. - W. Sup.*, 16 (2), 506-515.
- KOTI(Korea Transport Institute), (2012). Research of National Transport Demand, pp.359.
- K-water, (2014). Validation Review of Optimal Renewal Period for Multi-regional Water Supply Pipelines, pp.4-71.
- MOE(Ministry of Environment), (2016). 2015 Statistics of Waterworks.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport), (2014a). Investment Evaluation Guideline of Stabilization Project for Multi-regional Water Supply and Industrial Water Supply. p.Appendix.3.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport), (2014b). Statistics of Transport.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport), (2015). Waterworks Maintenance Basic Plan for Multi-regional Water Supply and Industrial Water Supply.
- Park, S. and Loganathan, G. V. (2002). Optimal pipe replacement analysis with a new pipe break prediction model, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 16 (6), 710-716.
- Pelletier, G., Mailhot, A., and Villeneuve, J. P., (2003). Modelling water pipe breaks - three case studies, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 129 (2), 115-123.
- Shamir, U. and Howard, C. D. D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement, *J. Am. Water Works Ass.*, 71 (5), 248-258.
- USEPA(Environmental Protection Agency), (2012). Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems (EPA/600/R-12/017). pp.87.
- Walski, T. M. (1987). Replacement rules for water mains, *J. Am. Water Works Ass.*, 79 (11), 33-37.
- Wang, C. W., Niu, Z. G., Jia, H. and Zhang, H. W. (2010). An assessment model of water pipe condition using Bayesian inference. *J. Zhejiang Univ. Sc. A*, 11 (7), 495-504.
- Watson, T. G., Christian, C. D., Mason, A. J., Smith, M. H. and Meyer, R. (2004). Bayesian-based pipe failure model. *J. Hydroinform.*, 6 (4), 259-264.

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065