

상수도 배수관로 시스템의 장기적 유지관리를 위한 방법론과 컴퓨터 알고리즘의 개발 및 적용

박수원[†]

부산대학교 사회환경시스템공학부

Development and Applications of a Methodology and Computer Algorithms for Long-term Management of Water Distribution Pipe Systems

Suwan Park[†]

Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University
(Received 14 March 2007, Accepted 24 April 2007)

Abstract

In this paper a methodology is developed to prioritize replacement of water distribution pipes according to the economical efficiency of replacement and assess the long-term effects of water main replacement policies on water distribution systems. The methodology is implemented with MATLAB to develop a computer algorithm which is used to apply the methodology to a case study water distribution system. A pipe break prediction model is used to estimate future costs of pipe repair and replacement, and the economically optimal replacement time of a pipe is estimated by obtaining the time at which the present worth of the total costs of repair and replacement is minimum. The equation for estimating the present worth of the total cost is modified to reflect the fact that a pipe can be replaced in between of failure events. The results of the analyses show that about 9.5% of the pipes in the case study system is required to be replaced within the planning horizon. Analyses of the yearly pipe replacement requirements for the case study system are provided along with the compositions of the replacement. The effects of water main replacement policies, for which yearly replacement length scenario and yearly replacement budget scenario are used, during a planning horizon are simulated in terms of the predicted number of pipe failures and the saved repair costs.

keywords : Long-term effects, Optimal replacement time, Water distribution system, Water main replacement policies

1. 서론

21세기에 들어서 인류가 직면한 가장 큰 문제의 하나는 사회기반시설의 노후에 따라 요구되는 시설의 개량 및 교체를 위한 최적의 유지관리 방안을 모색해야 한다는 것이다. 이와 관련하여 사회기반시설에 대한 전 세계적인 투자 규모는 매년 3조 달러에 달할 것으로 예측되고 있으며 (ASCE, 1996), 특히 사회기반시설 중 가장 중요한 시설의 하나인 상수도 배수관로와 그 부속시설의 교체를 위해 소요될 비용은 미국의 경우 2030년까지 2,500억 달러에 이를 것으로 보고되고 있다(AWWA, 2001). 우리나라의 경우에도 상수도 배수관망에 대한 중요성이 인식되어 정부와 지방자치단체에서는 1997년부터 2011년까지 3조8천억 원을 투입하여 노후관 4만 2천 km를 교체하는 노후수도관 개량 계획을 수립하였다(국립환경연구원, 2001). 이와 같이 노후관 개량사업에는 막대한 비용이 소요되므로 관로의 경제적 최적 교체방안을 이용하여 관로 교체사업을 시행하는 것이 바람직하다.

관로의 최적 교체방안을 결정하기 위한 방법론은 크게 확률 및 통계적 방법, 결정론적 방법 또는 노후도 점수평 가법으로 크게 나눌 수 있다. 확률 및 통계적 방법은 관로의 파손 기록을 이용하여 관로의 파손 경향을 분석하고 예측하는데 필요한 수학적 모형에 대한 연구를 포함하는데, 이들 모형을 분석대상에 따라 분류하면 '개별관로에 대한 모형'과 '관로그룹에 대한 모형'으로 구분할 수 있다. 관로의 최적 교체방안을 결정하기 위한 방법론에 관한 자세한 내용은 Rajani 등(2001)과 Kleiner 등(2001)에 매우 상세하게 수록되어 있으며, 관로의 파손 경향을 분석하고 예측하기 위한 '개별관로에 대한 모형'과 '관로그룹에 대한 모형'에 대한 검토는 박 등(2007)이 제공하고 있다.

관로의 최적 교체방안을 결정하기 위한 방법론은 배수관로의 갱생(rehabilitation) 혹은 교체를 위한 선행계획(proactive plan)을 위한 유용한 도구로 사용되어 왔으며, 최근에는 배수관망의 유지관리에 미치는 영향을 분석하고 관로 교체사업의 효과를 파악할 수 있는 관망 자산 관리시스템(asset management system) 혹은 의사결정시스템(decision support system)의 한 부분으로 사용하고자 하는 연구가 진행되어 오고 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
swanpark@pusan.ac.kr

배수관망의 유지관리를 위한 대표적인 의사결정시스템으로는 균일한 특성을 가지는 관로군의 수명에 대한 통계적 연구를 통하여 관재질의 종류에 따른 연간 관로 교체길이를 결정하는 Deb 등(1998)의 KANEW, 비동질적 포아송 파손 횟수 산정 모형을 이용하여 배수관망의 파손 횟수와 비용을 산정하는 Burn 등(2003)의 PARMs, 포아송 회귀분석과 GIS 소프트웨어의 공간분석 기능을 이용하여 관로군에 대한 파손을 예측, 교체대상 관로군 선정 및 교체 대안에 따른 분석을 실시하는 Malandain 등(1998)의 AssetMap, 주철관과 덕타일주철관의 물리적 노후도 모형을 이용하여 관로의 잔존수명을 예측하고, 관로의 수리학적 거동, 수질의 변화 및 신뢰성을 통합적으로 고려하여 관로의 교체 우선순위를 결정하는 유럽연합의 Brite/Euram programme에 의해 개발된 UtilNets(1997) 등이 있다.

본 논문에서는 관로의 유지관리를 위한 계획기간(planning period) 동안 개별관로의 파손 횟수를 관로파손 예측 모형을 이용하여 추정하고, 예측된 파손 횟수에 따른 관로의 보수비용과 교체비용의 합인 총비용의 현재값이 최소가 되는 경제적 최적 교체시기를 추정하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 개발하였으며, 이를 연구대상 지역의 배수관망에 적용하여 관로 교체 우선순위를 결정하였다. 또한 배수관망의 관로 교체를 위한 정책방향이 배수관망 시스템 전체에 미치는 영향을 파악하기 위하여 관망의 유지관리를 위한 시나리오를 연간 관로 교체길이와 관로 교체를 위해 지출가능한 연간 예산으로 구분하고, 관망 유지관리 계획기간 동안 각 정책의 실시에 따른 전체 관망 시스템의 파손 횟수와 관로의 교체에 따라 절약되는 보수비용을 산정하여 관로 교체 시나리오에 따른 시스템의 변화 양상을 추정할 수 있는 방법론과 컴퓨터 알고리즘을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 방법론과 컴퓨터 알고리즘의 개요

본 논문에서 개발된 배수관로 시스템내의 개별관로에 대한 최적 교체시기와 관로 교체 시나리오에 따른 시스템의 영향분석을 위한 방법론은 크게 두 가지 과정을 거치게 되는데, 첫 번째 과정은 개별관로의 경제적 최적 교체시기를 결정하고, 개별관로에 대해 관로시스템의 유지관리를 위해 설정한 계획기간 내의 연간 파손 횟수와 누적보수 비용의 현재값을 추정하여 행렬의 형태로 산정한다. 이러한 과정에서 개별관로의 파손시기는 관로의 파손경향이 지수적(exponential), 선형적(linear) 혹은 지수와 선형의 중간적 형태를 가지는 모든 경우에 적용될 수 있는 Park 등(2002)의 'General Pipe Break Prediction Model (GPBM)'을 이용하여 추정하였으며, 이러한 방법으로 예측된 파손시기를 이용하여 계획기간 내 각 년도에 발생할 것으로 예상되는 파손 횟수를 산정하였다.

Park 등(2002)의 GPBM은 누적파손 횟수를 파손시간에 대한 함수로 표현한 것으로써 다음과 같다.

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

여기서, $N_c(t)$ 는 시간 t 에서의 누적파손 횟수, t_0 는 분석을 위한 시작 시간(매설시간 또는 파손시기자료가 존재하는 최초의 시간), WF 는 가중계수(weighting factor), 그리고 A_{exp} , B_{exp} , A_{lin} 와 B_{lin} 는 곡선점합계수(curve fitting coefficients)를 나타낸다.

한편 계획기간 동안 관로의 파손시기를 추정하기 위하여 GPBM의 지수함수 부분과 선형함수 부분을 누적파손 횟수에 대한 함수로 표현할 필요가 있으며, 이는 다음과 같다.

$$T(N_c) = (1-\alpha)\{C_{exp} + D_{exp} \ln(N_c)\} + \alpha\{E_{lin} + F_{lin} \cdot N_c\} \quad (2)$$

여기서, T 는 매설시점을 기준으로 누적파손 횟수(N_c)에 해당하는 시간을 나타내며, α 는 가중계수, 그리고 C_{exp} , D_{exp} , E_{lin} , 및 F_{lin} 는 곡선점합계수를 나타낸다.

따라서 본 논문에서는 관로의 파손시기를 추정하기 위하여 개별관로에 발생한 누적파손 횟수(N_c)와 각 순차별 파손 횟수에 해당하는 시간의 관계를 식 (2)를 이용하여 모형화하였고, 이를 이용하여 계획기간 내에 발생할 파손시기를 예측하였다. 계획기간 내의 각 년도별 파손 횟수는 추정된 파손시기가 각 년도에 해당되는 횟수를 합산함으로써 산정하였다.

개별관로의 경제적 최적 교체시기를 결정하기 위한 대표적인 방법으로는 Shamir 등(1979)의 관로의 누적보수 비용의 현재값과 교체비용의 현재값의 합이 최소가 되는 시기를 산정하는 방법을 기본적으로 사용하였는데, 이러한 방법이 실제 관로 교체사업의 시행시에 나타날 수 있는 문제점을 개선하기 위하여 Shamir 등(1979)의 관로 보수 및 교체를 위한 총비용 산정을 위한 방법을 다음과 같이 수정하여 개발하였다.

Shamir 등(1979)은 n 번째 파손까지의 관로 유지관리 비용의 현재값을 산정하기 위한 다음과 같은 방정식을 제시하였다.

$$T_n = \sum_{i=1}^n \frac{C_i(1+i)^{t_i}}{(1+R)^{t_i}} + \frac{F_n(1+i)^{t_n}}{(1+R)^{t_n}} \quad (3)$$

여기서, T_n 은 시간 '0' 혹은 현재년에서의 총 비용, C_i 는 i 번째 파손에 대한 보수비용, F_n 은 n 번째 파손시의 교체 비용, i 는 연간 인플레이션율(1/year), R 은 연간 이자율(1/year), t_i 는 현재년으로부터 i 번째 파손까지의 경과시간(year), 그리고 t_n 은 현재년으로부터 n 번째 파손까지의 경과시간(year)을 나타낸다.

식 (3)으로 산정되는 관로 유지관리 총비용은 관로의 교체가 n 번째 파손 시에만 이루어진다는 가정, 즉 $n-1$ 번째 파손과 n 번째 파손 사이의 시간에서는 교체가 이루어지지 않는다는 가정을 내포하고 있다. 그러나 실제 관로 교체사업의 수행 시에는 관로의 교체시기에 대한 이와 같은 제약을 적용할 수 없는 경우가 많다. 따라서 보다 실제적인 관

로의 유지관리 비용을 산정하기 위해서는 파손사건이 발생하지 않은 시간 간격에서도 관로 교체가 시행될 수 있는 여건을 고려하여야 하며, 이러한 경우의 현재 년도로부터 유지관리 계획년도(planning horizon)까지의 관로의 총 유지관리 비용을 계산하기 위하여 식 (4)와 같은 방정식을 개발하였으며, 본 연구에서는 식 (4)가 최소가 되는 년도를 관로의 경제적 최적 교체시기로 결정하였다.

$$T_j = \sum_{j=0}^m \frac{C_j(1+i)^j}{(1+R)^j} + \frac{F_j(1+i)^j}{(1+R)^j} \quad (4)$$

여기서, m 은 현재 년도로부터 계획년도까지의 경과 시간(year), C_j 는 j 년도에서의 파손에 대한 보수비용, F_j 는 j 년도에서의 교체비용, i 는 연간 인플레이션율(1/year), 그리고 R 은 연간 이자율(1/year)을 나타내며, j 는 0으로부터 m 까지 변하는 정수이다.

본 논문에서 개발된 방법론의 두 번째 과정은 관로 교체 정책 시행의 종류에 따른 배수관로 시스템 전체의 영향을 분석하는 과정으로써, 첫 번째 과정에서 행렬의 형태로 산정된 개별관로의 년도별 파손 횟수와 그에 따른 누적보수

비용의 현재값을 이용하여 연간 교체예산 혹은 교체길이의 책정에 따라 배수관로 교체사업을 시행할 경우 각 년도에서 교체되어야 할 관로를 결정한다. 또한 이러한 교체사업의 시행으로 인하여 시스템 전체에서 발생하는 파손 횟수의 변화 및 관로 교체로 인해 절약된 파손보수비용을 모의하여 관로 교체사업의 효용성을 전체 시스템의 유지관리 측면에서 산정한다.

위와 같은 방법론을 수행하기 위한 알고리즘을 개략적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 보인 알고리즘 A와 B는 방법론의 첫 번째 과정과 두 번째 과정에 대한 알고리즘의 순서도를 나타내며, 이러한 알고리즘을 MATLAB을 이용하여 컴퓨터 프로그래밍을 하였다.

2.2. 관로의 파손 횟수, 누적보수 비용 및 경제적 최적 교체시기를 산정하기 위한 알고리즘

개별관로의 경제적 최적 교체시기를 산정하고, 개별관로의 계획기간 내 각 년도에 대해 추정된 파손 횟수와 누적보수 비용의 현재값을 행렬의 형태로 산정하는 알고리즘 A를 더욱 상세하게 도시하여 나타내면 Fig. 2와 같다.

알고리즘 A는 Fig. 2에 보인 바와 같이 배수관망의 유지

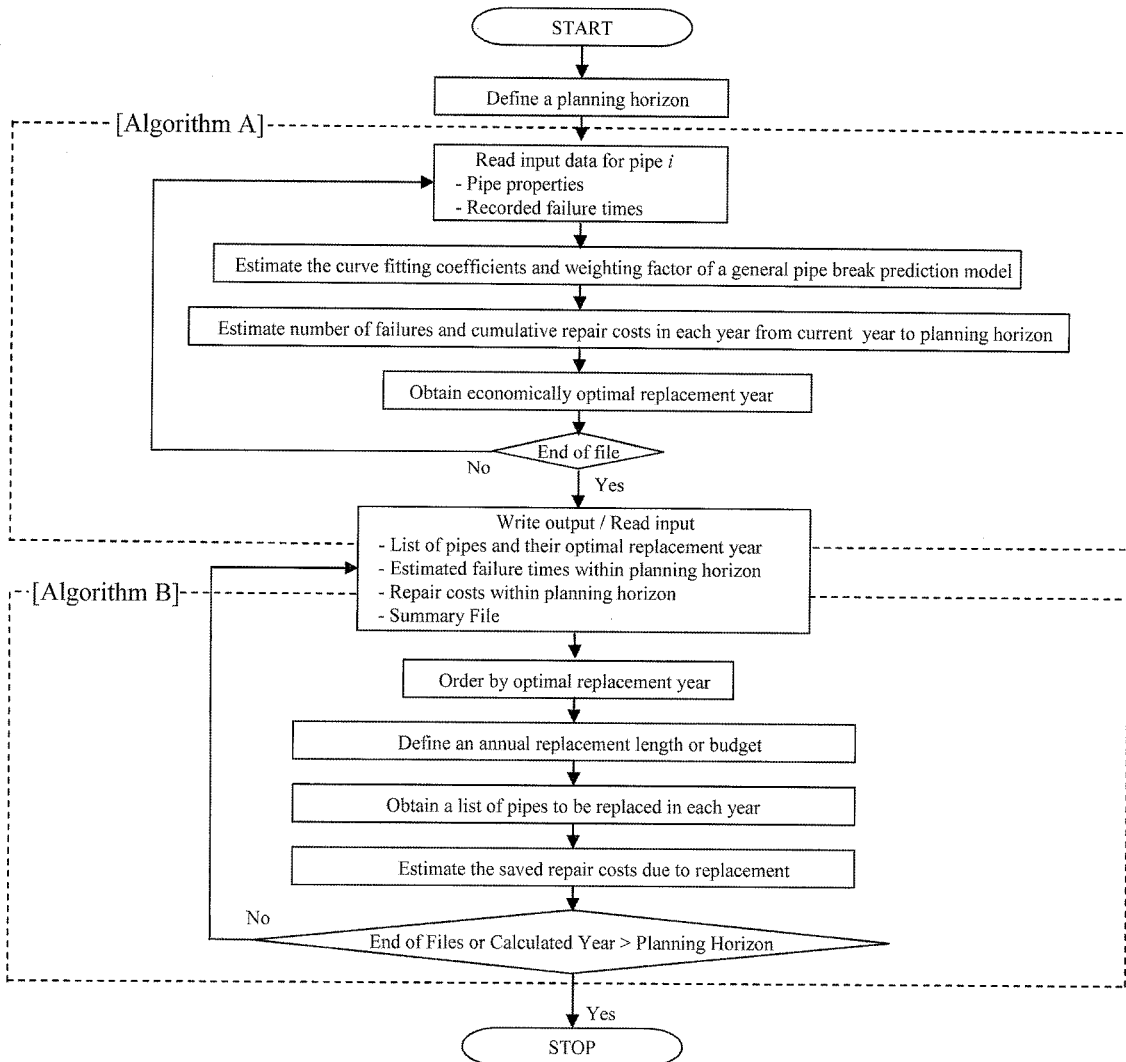


Fig. 1. Flow chart of the methodology.

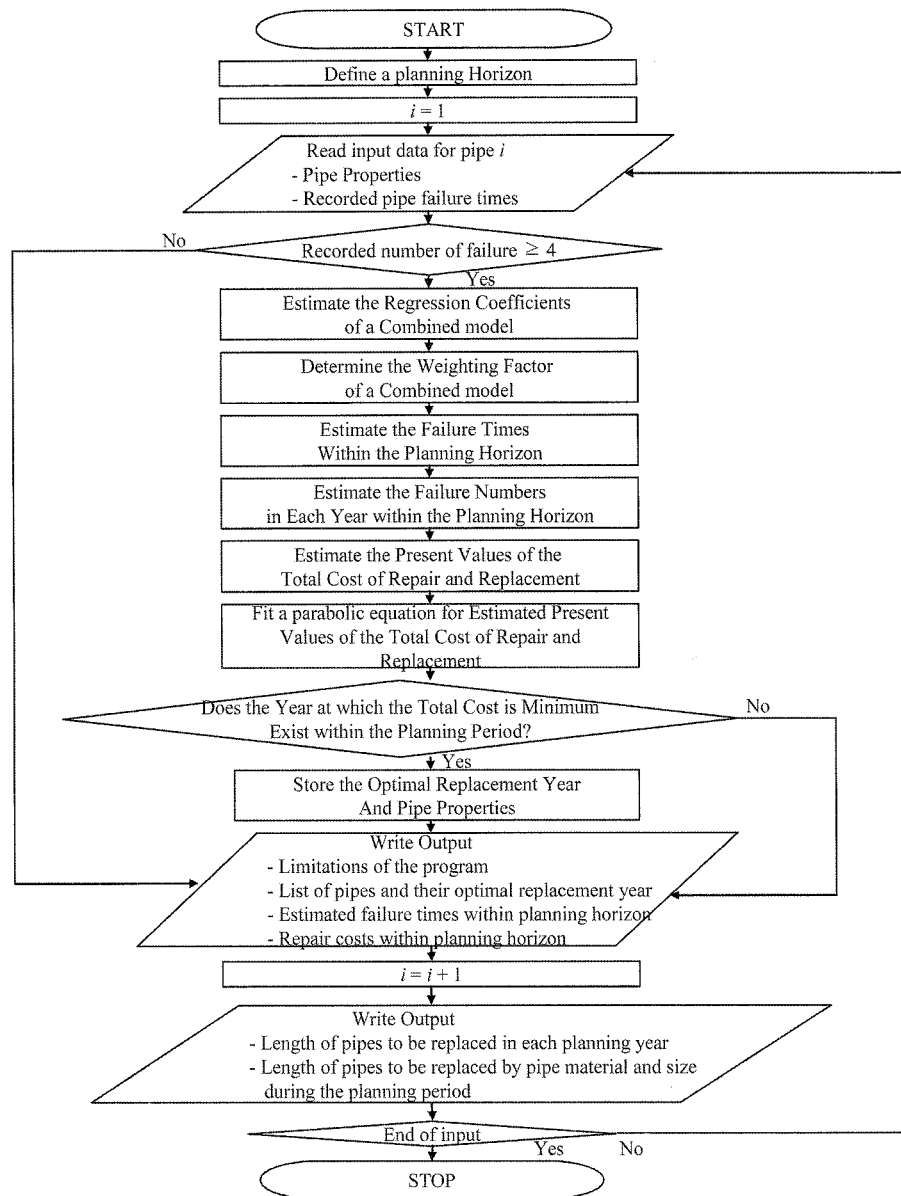


Fig. 2. Detailed flow chart for algorithm A.

관리 계획기간을 년도의 형태로 정의하는 것으로부터 시작한다. 다음으로 개별관로의 제원(관종, 관경, 길이 등)과 관로에서 발생한 파손시기를 관로 제원 데이터베이스(Pipe Property DB)와 관로 파손시기 데이터베이스(Pipe Break Time DB)로부터 읽어 들인다. 이 때 관로파손 예측모형을 이용하여 적절한 관로의 파손경향을 모형화하기 위하여 파손 횟수가 4 이상인 관로에 대해서만 분석을 수행하였다. 따라서 관로의 과거 파손회수가 4회 미만일 경우 파손자료 부족으로 인하여 파손예측 회귀모형을 구축할 수 없다는 문장을 출력하며, 4회 이상일 경우에는 개별관로의 기록된 누적 파손 횟수와 파손시기를 이용하여 Park 등(2002)의 'General Pipe Break Prediction Model (GPBM)'의 곡선접합계수(curve fitting coefficients) 및 하중계수(weighting factor)를 최소제곱법을 이용하여 추정한다. 여기서 분석을 위한 관로의 최소파손 횟수를 알고리즘에서 사용하는 이유는 Shamir 등(1979)과 Park 등(2002)의 관로파손예측 모형

과 같이 관로의 파손경향은 일반적으로 곡선의 형태를 가진다는 사실에 기초한 것이다. 따라서 이론적으로 가능한 최소파손 횟수는 3회이나 본 논문에서는 최소파손 횟수를 4회로 선택함으로써 좀 더 신뢰도 높은 관로파손예측 모형이 구축되도록 하였다.

추정된 GPBM을 이용하여 계획기간 동안 발생하는 파손 사건의 시기를 예측한 다음 계획기간 내의 각 년도별 파손 횟수를 계산하고 그에 따른 연간 보수비용과 교체비용의 합인 총비용의 현재값을 식 (4)를 이용하여 계산한다. 관로의 경제적 최적 교체시기는 식 (4)로 산정되는 관로의 총비용의 현재값이 최소가 되는 해가 선정되게 된다. 여기서 관로 교체에 관련된 총비용의 현재값은 추정된 GPBM의 정확도에 좌우되게 된다. 따라서 예측된 계획기간 내의 년간 파손 횟수의 불확실성을 고려하기 위하여 각 년도에 대해 추정된 총비용의 현재값을 포물선 방정식으로 곡선접합(curve fitting)한 다음 추정된 포물선 방정식의 최소값이 계

획기간 내에 존재할 경우 그 최소값이 발생하는 년도를 관로의 경제적 최적 교체시기로 결정하였다.

이러한 알고리즘 A를 이용하여 관로의 경제적 최적 교체시기 및 계획기간 내의 연간 파손 횟수와 누적보수 비용의 현재값을 행렬의 형태로 산정하는 예를 들면 다음과 같다. Table 1은 예를 들기 위해 사용된 연구대상 지역의 한 관로의 제원, 매설시기 및 파손시기에 대한 기록을 나타내며, 또한 관로의 보수 및 교체비용, 이자율과 인플레이션을 나타낸다. 분석을 위한 계획기간은 1998년부터 2027년까지인 30년간을 사용하였으며, 따라서 계획년도는 2027년이 된다.

이 관로의 계획기간 내 연간 파손 횟수, 누적보수 비용 및 경제적 최적 교체시기를 결정하기 위하여 먼저 기록된 파손시기와 누적파손 횟수를 이용하여 식 (2)의 곡선접합계수를 최소제곱법을 이용하여 산정하면 $C_{exp} = 31.4068$, $D_{exp} = 6.2105$, $E_{lin} = 32.2338$, $F_{lin} = 1.6014$ 와 같고 가중계수 α 는 0.30으로 추정된다. 따라서 이 관로의 GPBM을 누적 파손 횟수에 대한 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$T(N_c) = 0.7\{31.4068 + 6.2105\ln(N_c)\} + 0.3\{32.2338 + 1.6014N_c\} \quad (5)$$

Table 1에 보인 관로의 기록된 파손시간과 식 (5)로 산정된 GPBM을 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다.

Table 2는 식 (5)로 추정된 이 관로의 GPBM을 이용하여 관로의 보수 및 교체와 관련된 비용을 계산한 결과를 보여 주는데, Table 2의 첫 번째 행은 식 (5)를 이용하여 계획기간(1998~2027년) 동안의 파손시기를 매설 후 경과 연수로 추정한 결과이며, 두 번째 행은 추정된 파손시기를 이용하여 산정된 계획기간 내 각 년도별 파손 횟수를 나타낸다. Table 2의 세 번째 행과 네 번째 행은 년도별 관로 교체비용의 현재값 및 년도별 파손 횟수에 따른 관로의 누적보수 비용의 현재값을 나타내며, 다섯 번째 행은 식 (4)를 이용하여 계산한 누적보수 비용 및 교체비용의 총합의 현재값을 나타낸다.

이 관로의 경제적 최적 교체시기는 Table 2에서 계산된 총비용의 현재값이 최소가 되는 시기로 결정될 수 있으나, 식 (5)를 이용하여 산정되는 관로 파손시기 예측의 불확실성을 고려하기 위하여 총비용의 현재값이 변화되는 경향을 Fig. 4와 같이 포물선을 이용하여 곡선접합하고 이러한 포물선으로부터 산정되는 총비용의 현재값이 최소가 되는 시기를 관

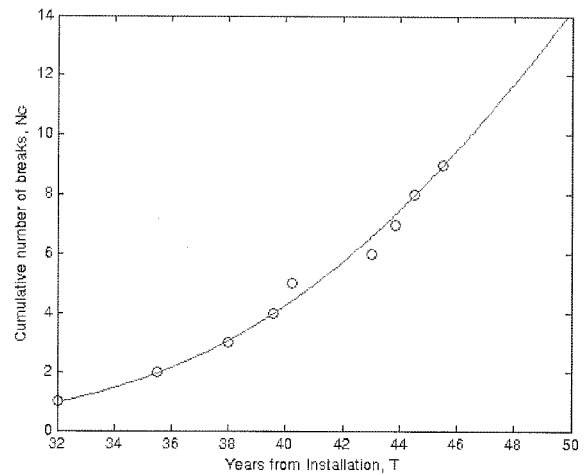


Fig. 3. Plot of the recorded failure times and the corresponding GPBM.

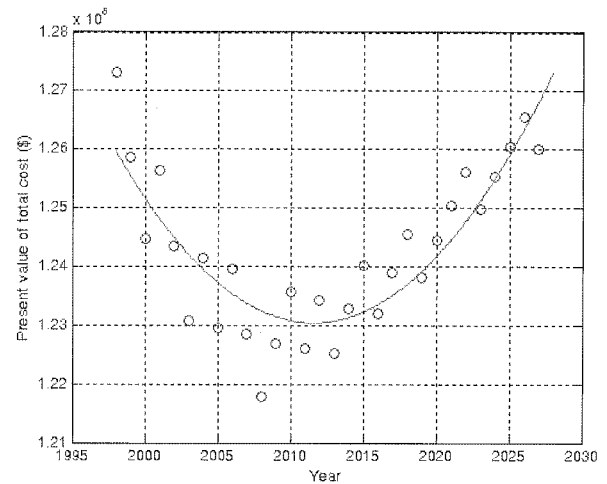


Fig. 4. Plot of a parabolic equation using the present values of the total cost.

로의 최적 교체시기로 추정하였다. 따라서 Fig. 4로부터 이 관로의 경제적 최적 교체시기는 2011년으로 결정된다.

2.3. 관로 교체 시나리오에 따른 시스템의 영향을 분석하기 위한 알고리즘

상수도 배수관로 시스템의 관리자는 일반적으로 관리 대상이 되는 시스템의 유지관리를 위해 연간 관로 교체길이를 지정(yearly replacement length scenario)하거나 관로 교체를 위한 연간예산을 배정하는 정책(yearly replacement

Table 1. Properties, costs and recorded failure times of an example pipe

Category	Specification/Data
Length (m)	409 (1342 ft)
Installation time	January, 1952
Replacement cost per unit length (US \$)	92.77
Repair cost (US \$/repair)	2,814
Interest rate (%)	4.5
Inflation rate (%)	1.0
Recorded failure times (Elapsed months from installation)	384, 426, 456, 475, 483, 516, 526, 534, 546

Table 2. Estimated number of breaks and present values of the total cost

Estimation criteria	Values													
Predicted time of failure since installation (elapsed years since installation)	46.4692,	47.3639,	48.2226,	49.0510,	49.8536,	50.6339,	51.3949,	52.1389,	52.8678,	53.5833,	54.2867,	54.9792,	55.6618,	56.3355,
	57.0009,	57.6588,	58.3097,	58.9542,	59.5928,	60.2257,	60.8535,	61.4765,	62.0949,	62.7091,	63.3193,	63.9257,	64.5286,	65.1282,
	65.7245,	66.3179,	66.9083,	67.4961,	68.0813,	68.6640,	69.2443,	69.8225,	70.3984,	70.9723,	71.5443,	72.1143,	72.6826,	73.2491,
	73.8139,	74.3770,	74.9388,	75.4990										
Predicted number of failure in each planning year	1, 1,	1, 2,	1, 1,	2, 1,	2, 1,	1, 2,	2,	1, 2,	1, 2,	1, 2,	1, 2,	1, 2,	2,	2,
	1, 2,	1, 2,	2, 1,	2, 2,	2, 2,	1, 2,	2,	2, 2,	1, 2,	2, 2,	2, 2,	2, 2,	2,	1,
	2, 2,	2, 1,												
Present value of the installation costs (US \$100,000)	1.2450,	1.2033,	1.1630,	1.1240,	1.0864,	1.0500,	1.0148	0.9808,	0.9480,	0.9162,	0.8855,	0.8559,	0.8272,	0.7995
	0.7727,	0.7469,	0.7218,	0.6977,	0.6743,	0.6517,	0.6299	0.6088,	0.5884,	0.5687,	0.5496,	0.5312,	0.5134,	0.4962
	0.4796,	0.4636												
Present value of the accumulated repair costs (US \$10,000)	0.2814,	0.5534,	0.8162,	1.3244,	1.5699,	1.8072,	2.2660,	2.4877,	2.9162,	3.1233,	3.3235,	3.7104,	4.0844,	4.2651,
	4.6144,	4.7832,	5.1095,	5.4249,	5.5773,	5.8719,	6.1567,	6.2943,	6.5603,	6.8173,	7.0658,	7.1859,	7.4180,	7.6423,
	7.8592,	7.9639												
Present value of the total costs (US \$100,000)	1.2731,	1.2586,	1.2446,	1.2565,	1.2434,	1.2307,	1.2414,	1.2296,	1.2396,	1.2286,	1.2179,	1.2269,	1.2357,	1.2260,
	1.2342,	1.2252,	1.2328,	1.2402,	1.2320,	1.2389,	1.2456,	1.2382,	1.2444,	1.2504,	1.2562,	1.2498,	1.2552,	1.2605,
	1.2655,	1.2600												

budget scenario)을 수립할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 정책의 시행이 전체 배수관로 시스템의 유지관리에 끼치는 영향을 분석하기 위한 알고리즘(Fig. 1의 알고리즘 B)을 Fig. 5와 같이 개발하였다. 이러한 알고리즘을 이용하여 정책 시나리오에 따른 계획기간 동안 시스템 전체의 파손 횟수의 변화 및 그에 따른 절약된 관로파손 보수비용을 산정하는 것이 가능하며, 시스템 관리자가 관로 교체를 실시하지 않은 시나리오의 결과와 비교하여 정책 시행의 효과를 파악할 수 있다.

알고리즘 B에서 사용되는 입력 자료는 알고리즘 A에서 출력되는 자료로써 개별관로의 제원과 최적 교체시기에 대한 파일과 개별관로의 계획기간 내의 연간 파손 횟수 및 그에 따른 보수비용을 행렬의 형태로 기록한 출력파일이다. 알고리즘 B의 기본적인 구조는 관로 교체 정책에 따라 연간 교체 길이 또는 연간 교체 예산의 범위 내에 해당하는 관로들을 순차적으로 교체 관로로 배정하고 그 범위를 초과하는 관로들은 다음 년도에서 교체를 위한 관로로 고려하는 것이다.

데이터베이스에 수록된 관로의 순서를 재배치하는 방법으로는 관로시스템 내에서 관로가 차지하는 수리학적 역할 및 급수인구에 따른 방법 등을 들 수 있으나, 본 논문에서는 알고리즘 A로부터 출력되는 개별관로의 제원과 최적 교체시기에 대한 파일을 최적 교체시기가 커지는 순으로 개별관로를 재정렬하는 방법을 사용하였다. 따라서 실제 교체사업의 시행시에는 개별관로에 대해 추정된 경제적 최적 교체시기에 구애받지 않고 최적 교체시기가 작은 값을 가

지는 관로를 우선 교체하는 정책을 시행하는 것으로 가정하였다. 알고리즘 B는 이러한 방법으로 재정렬된 관로의 순서에 따라 연간 교체 길이 또는 연간 교체 예산의 범위 내에 해당하는 관로들을 순차적으로 교체 관로로 배정한다. 한편 알고리즘 A로부터 산정되는 개별관로의 계획년도별로 예측된 파손 횟수 및 그에 따른 보수비용을 나타내는 행렬의 순서도 최적 교체시기가 커지는 순서로 재정렬되어 알고리즘 B의 입력자료로 사용된다.

이 과정에서 어떤 관로가 교체될 것으로 결정된 년도 이후에 발생할 것으로 추정된 파손은 관로 교체로 인하여 발생하지 않는다고 가정하면, 그 관로가 교체되는 년도 이후에 대한 파손사건은 '절약되는 파손사건의 횟수(number of saved failure incidents)'로 파악할 수 있으며 그에 따른 보수비용은 관로를 교체하므로써 '절약되는 보수비용(saved repair costs)'으로 파악할 수 있다. 이와 같은 개념을 이용하여 관로 교체 정책에 따라 결정된 개별관로의 교체년도 이후부터 계획년도까지 발생할 것으로 추정되는 파손으로 인한 연간 보수비용의 현재값을 누적하여 개별관로의 교체로 인해 '절약되는 보수비용'으로 산정하였다. 따라서 개별관로의 '절약되는 보수비용'은 관로의 교체년도에 발생하게 되며, 계획기간 내의 연간 '절약되는 보수비용'은 해당 년도에 교체되는 관로들의 '절약되는 보수비용'을 합산하므로써 산정된다.

2.4. 연구대상 지역의 상수도 배수관로 시스템에 대한 적용

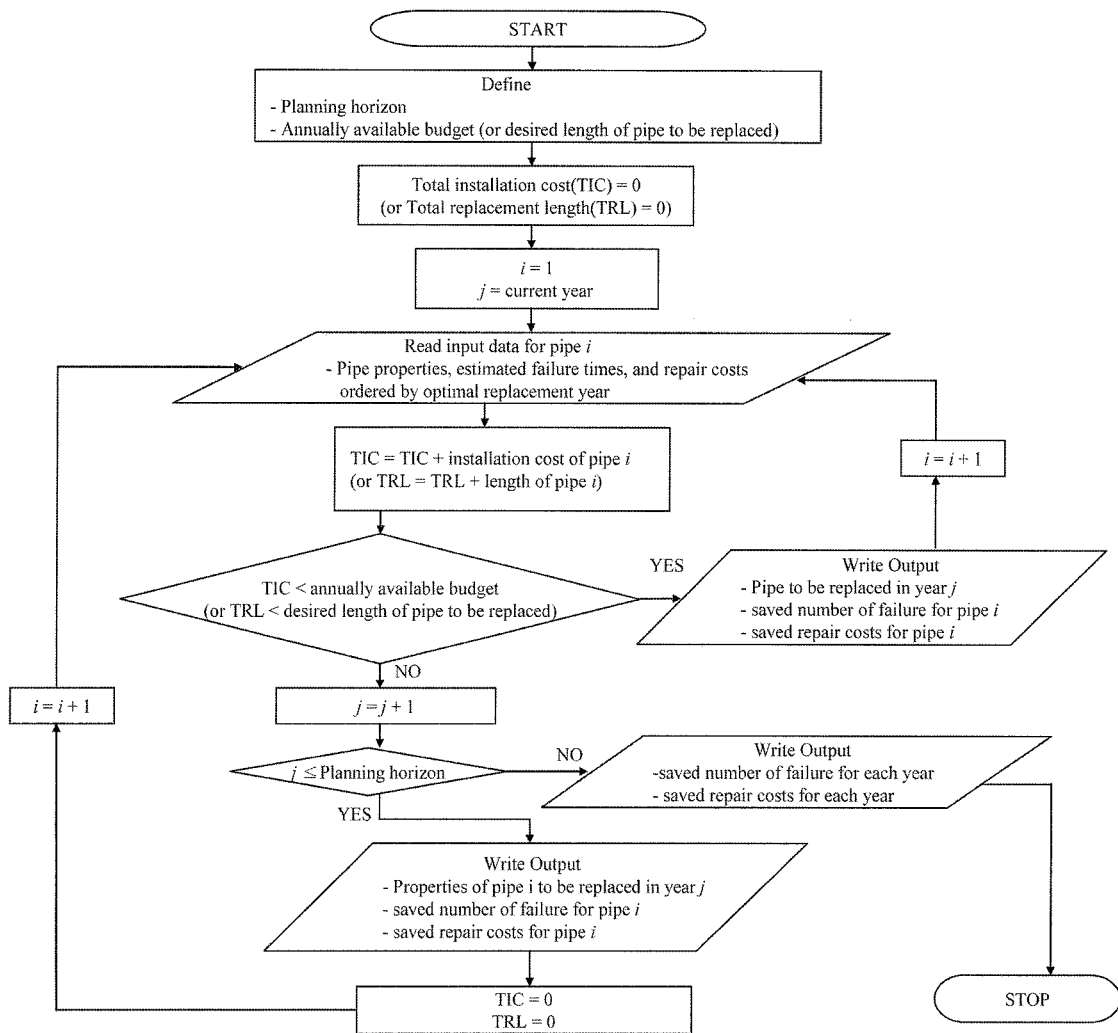


Fig. 5. Detailed flow chart for algorithm B.

본 논문에서 개발된 배수관로의 경제적 유지관리를 위한 방법론과 컴퓨터 알고리즘은 미국 중북부의 한 도시 지역의 상수도 배수관로 시스템에 적용되었다. 연구대상 지역의 Pipe Property DB에는 1903년부터 1974년까지 매설된 관로의 재질, 매설시기, 관경, 길이 등에 대한 자료가 기록되어 있다. 이 지역의 배수관로의 총길이는 약 2,735 km이며 주철관(cast iron pipe) 및 덕타일주철관(ductile cast iron pipe)이 각각 75% 및 20%로 대부분을 차지하고, 그 외 수도용 아연도강관·콘크리트·석면시멘트·플라스틱 관종 등으로 구성된다. 주철관은 제작 및 연결 부위의 방식에 따라 고정 연결방식인 Spun-Rigid 주철관(Spun CI Rigid)과 유연한 연결방식인 Spun-Flex 주철관(Spun CI Flex)으로 구분될 수 있으며, 그 외 Pit 주철관(Pit CI)과 덕타일주철관(DI)으로 구분된다. 배수관로의 직경은 6 또는 8 inch(호칭경 150 mm 또는 200 mm) 관로가 약 79%로 연구대상 지역 배수관로의 대부분을 차지한다. 본 논문에서 개발된 방법론과 컴퓨터 알고리즘은 Pipe Property DB와 Pipe Break Time DB에 수록된 배수관로의 대부분을 차지하는 주철관 및 덕타일주철관의 모든 관경의 종류에 대해 적용되었다.

연구대상지역의 Pipe Break Time DB에는 Pipe Property DB에 수록된 9,369개 개별관로의 1965년 1월부터 1997년 12월까지 발생한 파손사건에 대한 시간에 대한 자료를 포함하고 있다. Fig. 6은 연구대상 지역의 배수관로 중 분석 대상 배수관로의 관종별 길이 및 파손 횟수를 백분율로 표현한 것이며, Fig. 7은 연구대상 지역 배수관로에 발생한 파손사건의 빈도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

연구대상지역의 Pipe Break Time DB에 기록된 가장 최근의 배수관로 파손시기는 1997년 12월이다. 따라서 본 논문에서 개발된 알고리즘에서는 1998년을 분석을 위한 현재 년도로 사용하였으며, 배수관로 시스템의 유지관리를 위한 계획기간은 30년을 사용하였다. 또한 관로의 경제적 최적 교체시기를 산정하기 위한 이자율과 인플레이션율은 각각 0.045 및 0.01로 가정하였다. 관로의 관경에 따른 보수비용과 교체비용은 연구대상지역 배수관로 시스템 관리회사에서 제공된 Table 3과 같은 값을 사용하였다.

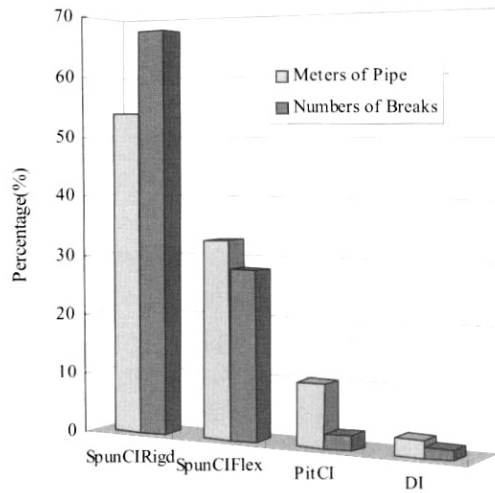


Fig. 6. Percentage of breaks and lengths for pipe material-joint type.

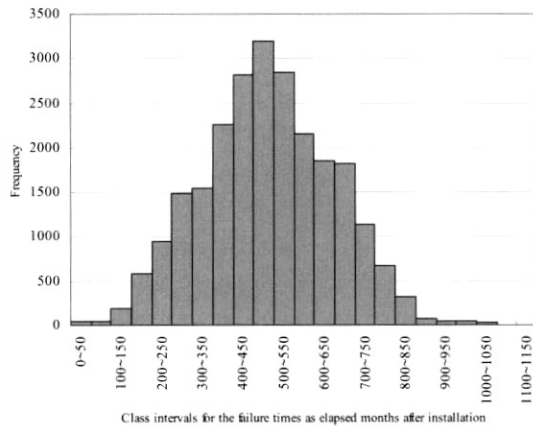


Fig. 7. Frequency histogram of the failure times.

본 논문에서 사용된 이자율과 인플레이션율은 본 논문에서 개발된 방법론의 적용과 분석을 위한 예를 들기 위한 값으로써, 연구대상지역의 분석에 사용된 이자율은 미국 예

산관리처(Office of Management and Budget, 1992)에서 발행하는 명목금리(nominal interest rate) 회람(OMB Circular No. A-94)을 참조하였다. 또한, 인플레이션율은 미국 노동 통계국(Bureau of Labor Statistics)의 인플레이션 계산기 (<http://data.bls.gov/cgi-bin/cpicalc.pl>)를 이용하여 1997년 1월의 소비자 물가지수(Consumer Price Index)를 기준으로 1997년 1월부터 1998년 1월까지 변동된 소비자 물가지수의 변동률을 연구대상지역의 분석을 위한 인플레이션율로 사용하였다.

본 논문에서 개발된 알고리즘 A를 연구대상 지역의 배수관로 시스템에 적용하여 MATLAB으로 프로그래밍한 결과는 Table 4, Table 5 및 Table 6과 같다.

Table 4는 알고리즘 A로부터 산정되는 개별관로의 경제적 최적 교체시기가 계획기간 내에 존재하여 계획기간 동안 교체되어야 하는 관로의 관종별 길이와 분석대상 관로의 총길이 2,735 km에 대한 백분율을 관종별로 나타낸 값이다. 따라서 연구대상 지역 분석대상 관종 중 Spun-Rigid 주철관(Spun CI Rigid)이 교체되어야 할 길이가 185.1 km로 가장 많이 교체되어야 하며, 덕타일주철관(DI)의 교체 길이는 0.7 km로 가장 적게 교체되어야 하는 것으로 산정되었다. 한편 교체되어야 할 관로의 총 길이는 259.2 km로 분석대상 관로의 총 길이 2,735 km의 약 9.5%를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 5는 계산된 관종별 교체 길이에 대한 추가적인 분석결과를 나타내는데, Table 5의 다섯 번째 열의 계산 값(Proportion of Replacement Length per Category-I)으로부터 Spun-Rigid 주철관은 매설 길이 1,472 km 중 교체되어야 할 길이가 185.1 km로 Spun-Rigid 주철관의 12.6%가 교체되어야 함을 알 수 있으며, 덕타일주철관은 매설 길이 77 km 중 교체되어야 할 길이가 0.7 km로 덕타일주철관의 0.9%가 교체되어야 함을 알 수 있다. 따라서 관종별 매설 길이에 대한 관종별 교체 길이는 위의 분석대상 관로 총 길이 2,735 km에 대해 요구되는 관종별 교체 길이에 대한

Table 3. Repair and replacement costs by pipe size

Size (inch)	Size (mm)	Repair cost (\$/break)	Replacement cost (\$/m)
4	101.6	93	7,873
6	152.4	93	9,380
8	203.2	97	13,283
12	304.8	116	25,843
16	406.4	128	28,493
20	508	141	31,413
30	762	156	34,633

Table 4. Total replacement length and replacement percentage by pipe category

Category	Replacement length (km)	Replacement percentage (%)
Pit CI	9.3	0.34
Spun CI Rigid	185.1	6.77
Spun CI Flex	64.1	2.34
DI	0.7	0.03
Total	259.2	9.5

Table 5. Total replacement length percentage for each pipe category

Category	Length (km)	Proportion of length (%)	Replacement length (km)	Proportion of replacement length per category-I (%)	Proportion of replacement length per category-II (%)
Pit	287	10.5	9.3	3.2	30.9
SCIR	1472	53.8	185.1	12.6	23.4
SCIF	899	32.9	64.1	7.1	21.7
DI	77	2.8	0.7	0.9	32.3
Total	2735	100	259.2	23.9	-

분석의 결과와 같이 Spun-Rigid 주철관이 가장 많이 교체되어야 하며 덕타일주철관이 가장 적게 교체되어야 할 것으로 나타났다.

그러나 이러한 교체되어야 할 관종별 관로의 길이를 분석대상 관로의 총 길이에 대해 각 관종이 차지하는 비율을 이용하여 분석해 보면, Spun-Flex 주철관(Spun CI Flex)의 매설 길이는 분석대상 관로의 총 길이 2,735 km의 32.9%를 차지하나 그 중 7.1%가 교체되어야 하므로, Spun-Flex 주철관의 매설 길이가 분석대상 관로의 총 길이에 차지하는 비율을 기준으로 하면 Spun-Flex 주철관은 21.7%가 교체되어야 하며, 덕타일주철관의 매설 길이는 분석대상 관로의 총 길이 2,735 km의 2.8%를 차지하나 그 중 0.9%가 교체되어야 하므로, 덕타일주철관의 매설 길이가 분석대상 관로의 총 길이에 차지하는 비율을 기준으로 하면 덕타일주철관은 32.3%가 교체되어야 하는 것으로 산정된다. 이러한 방식으로 산정된 관종별 교체 길이가 Table 5의 마지막 열(Proportion of Replacement Length per Category-II)에 계산되어 있는데, 이로부터 분석대상 관로의 총 길이 및 관종별 매설 길이에 대한 관종별 교체 길이의 비율은 차이를 나타내나, 관종별 매설 길이가 분석대상 관로의 총 길이에 차지하는 비율을 기준으로 하면 관종별 매설 길이의 백분율은 큰 차이가 나지 않는 것으로 분석되어 분석대상 관로의 관종에 따른 상대적인 노후도는 큰 차이가 나지 않는 것으로 사료된다.

관로의 경제적 최적 교체시기가 계획기간의 최초년도인 1998년에 해당하는 관로들의 총 길이는 177.6 km인 것으로 산정되었으며, 그 이후 1999년에서 계획년도인 2027년까지의 기간이 경제적 최적 교체시기로 산정된 관로의 총 길이는 81.7 km인 것으로 산정되었다. 따라서 분석대상 관로의 대부분이 계획기간의 최초년도인 1998년에 교체되어야 하는 것으로 나타나는데, 이는 관로들이 대부분 노후되어 경제적인 관로교체를 위해서는 분석대상 관로들의 대부분을 가능한 한 빨리 교체하여야 하는 것으로 분석된다. 한편 계획기간의 최초년도에 교체되어야 할 관로 약 177 km를 모두 교체할 경우 그 비용은 약 \$55,070,000으로 계산되는데, 실제 관로 교체사업의 계획과정에서 이러한 예산을 확보할 수 없을 경우 계획기간 동안 연간 교체 예산 혹은 교체 길이를 책정하고 그에 따라 관로 교체사업을 다음과 같이 수립할 수 있다.

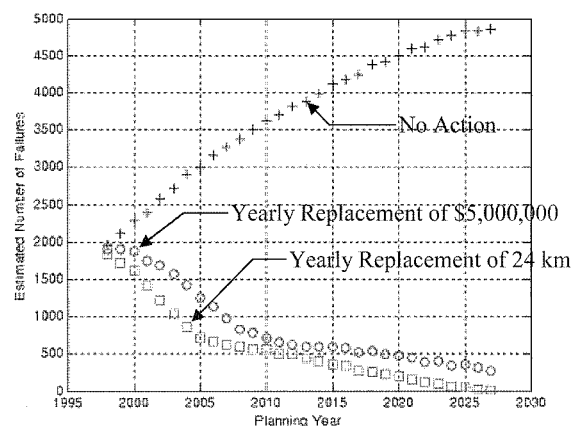
알고리즘 A로부터 출력되는 관로별 최적 교체시기를 이용하여 연구대상 지역의 관로 교체를 위한 정책을 연간 관로 교체길이를 지정하는 경우와 관로 교체를 위한 연간 예

산을 배정하는 정책을 시행하는 경우, 그리고 관로 교체를 시행하지 않는 “No-Action”의 경우에 대해 알고리즘 B를 MATLAB으로 프로그래밍하고 모의한 결과는 다음과 같다.

Fig. 8은 연구대상 배수관로 시스템에 대해 알고리즘 B의 계획기간을 1998년부터 2027년까지로 설정하고, 연간 교체예산을 \$5,000,000로 설정하여 교체를 실시하였을 경우(‘o’ 표시)와 관로 교체를 전혀 실시하지 않았을 경우(‘+’ 표시) 및 연간 교체길이를 24 km(약 15 mile)로 하여 교체를 실시하였을 경우(‘□’ 표시)에 대해 계획기간 동안의 각 연도별로 추정된 파손 횟수를 산정한 결과를 나타낸다.

한편 Fig. 9는 연간 교체예산 \$5,000,000에 따라 관로 교체를 시행할 경우 계획기간 동안의 각 연도에서의 관로 교체로 인해 절약되는 보수비용(‘□’ 표시)과 연간 교체길이 24 km에 따라 관로 교체를 시행할 경우의 연도별 관로 교체로 인해 절약되는 보수비용(‘*’ 표시)을 나타낸다.

Fig. 8로부터 연구대상 지역의 배수관로 교체사업을 시행하지 않을 경우 배수관로 시스템에서 발생하는 총 파손 횟수는 2027년에 약 5,000 건에 이를 것으로 추정되나, 연간 교체길이 24 km 혹은 연간 교체예산 \$5,000,000에 따라 관로 교체사업을 시행할 경우 배수관로의 파손 횟수는 감소하기 시작하여 2027년에는 약 300건 이하로 감소할 것으로 추정된다. 한편 Fig. 9로부터 관로 교체를 위한 두 가지 정책 모두에 대해 계획 초기 약 10년 동안 절약되는 보수비용이 크게 발생하는 것으로 보이는데, 이는 관로가 교체되지 않을 경우 파손 횟수는 계속 증가하게 되며 따라서 관로가 교체되는 년도로부터 계획년도까지의 기간이 길수록 절약되는 보수비용도 커지기 때문인 것으로 분석된다.

**Fig. 8.** Plot of estimated number of failures for the replacement scenarios.

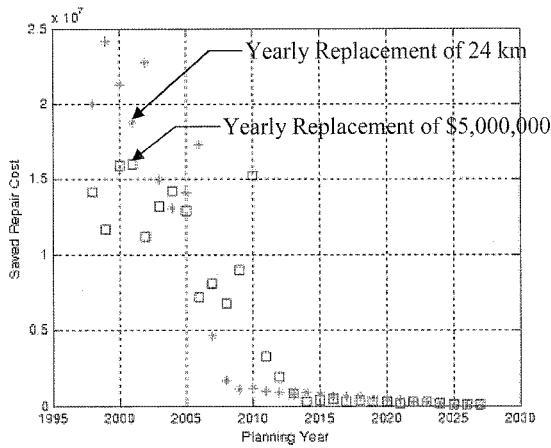


Fig. 9. Plot of estimated saved repair costs for replacement scenarios.

또한 계획기간의 초기에 과거 파손이 많이 발생한 노후관로를 먼저 교체하게 되고, 이러한 노후관로에서 발생하는 많은 수의 부가적인 파손이 예방되기 때문에 계획기간의 초기에 절약되는 보수비용이 크게 발생하는 것으로 분석된다. Fig. 8과 Fig. 9에서 관로 교체를 위한 정책에 따라 분석대상 관로 전체에 대해 예측된 파손 횟수와 절약된 보수비용에 차이가 나는 이유는 관로 교체를 위한 정책에 따라 계획기간 동안 교체되는 관로의 개수를 나타내는 Fig. 10을 이용하여 분석할 수 있다.

Fig. 10으로부터 연간 교체길이 24 km에 따라 교체사업을 시행하는 경우가 연간 교체예산 \$5,000,000에 따라 교체사업을 시행하는 경우보다 교체되는 관로의 개수가 대체적으로 많음을 볼 수 있다. 따라서 연간 교체길이 24 km에 따라 교체사업을 시행하는 경우 교체되는 관로의 개수가 상대적으로 많으며, 이로 인하여 관로가 교체되지 않을 경우 발생할 수 있는 파손 횟수가 그만큼 감소되므로 Fig. 8에서 연간 교체길이 24 km에 따라 교체사업을 시행하는 경우 상대적으로 예측되는 파손 회수가 대체적으로 적음을 알 수 있다. 또한 이러한 교체되는 관로의 개수의 차이로 인하여 Fig. 9에서 보인 바와 같이 연간 교체길이 24 km에 따라 교체사업을 시행하는 경우가 연간 교체예산 \$5,000,000

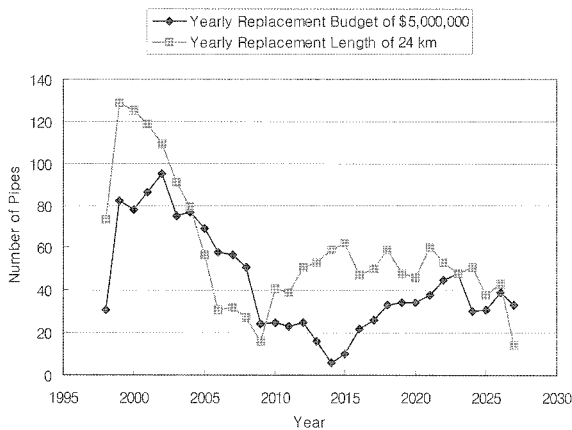


Fig. 10. Plot of estimated number of pipes to be replaced.

에 따라 교체사업을 시행하는 경우보다 절약되는 보수비용이 대체적으로 크게 나타나는 것으로 분석된다.

4. 결론

본 논문에서는 상수도 배수관로 시스템의 개별관로의 경제적 최적 교체시기를 결정하기 위한 방법론을 바탕으로 관로 교체 우선순위와 관로 교체를 위한 정책이 관로시스템 전체에 미치는 영향을 분석하기 위한 알고리즘을 개발하였고, 이를 연구대상 지역의 배수관로 시스템에 적용하였다. 본 논문에서 개발된 알고리즘을 이용하여 컴퓨터 프로그램하고 연구대상 지역의 대부분을 차지하는 주철관 및 덕타일 주철관의 모든 관경의 종류에 대해 적용한 결과는 다음과 같다.

- 1) 연구대상 지역 분석대상 관로의 9.5%가 계획기간인 1998년에서 2027년 사이에 교체되어야 하는 것으로 산정되었다
- 2) 계획기간 내 분석대상 관로의 6.8%가 Spun-Rigid 주철관이며, 이는 총 Spun-Rigid 주철관의 12.6%를 차지하여 다른 관종에 비해 상대적으로 많은 교체가 필요한 것으로 나타났다. 그러나 관종별 매설 길이가 분석대상 관로의 총 길이에 차지하는 비율을 기준으로 하면 관종별 매설 길이의 백분율은 큰 차이가 나지 않는 것으로 분석되어 분석대상 관로의 관종에 따른 상대적인 노후도는 큰 차이가 나지 않는 것으로 사료된다.
- 3) 연구대상 지역의 대부분의 관로가 계획기간의 최초년도인 1998년에 교체되어야 하는 것으로 나타나는데, 이는 분석대상 관로들이 노후되어 경제적인 관로교체를 위해서는 관로의 대부분이 가능한 한 빨리 교체되어야 하는 것으로 분석된다.
- 4) 관로 교체를 위한 정책으로 연간 교체길이 24 km 혹은 연간 교체예산 \$5,000,000를 이용하는 경우를 관로 교체를 실시하지 않는 “No-Action”의 경우와 비교한 결과, 두 경우 모두 배수관로 시스템에서 발생하는 파손 횟수를 감소시켜 계획년도 2027년에 이르면 시스템 전체의 파손 횟수는 1998년 현재 약 2,000건의 파손 횟수로부터 약 300건 이하로 감소할 것으로 추정된다.
- 5) 관로 교체를 위한 두 가지 정책 모두에 대해 계획 초기 약 10년 동안 절약되는 보수비용이 크게 발생하며 시간의 경과에 따라 절약되는 보수비용은 감소하는 것으로 나타났다.
- 6) 관로 교체를 위한 정책에 따라 분석대상 관로 전체에 대해 예측된 파손 횟수와 절약된 보수비용에 차이가 나는 이유는 연간 교체길이 24 km에 따라 교체사업을 시행하는 경우 교체되는 관로의 개수가 상대적으로 많으며, 이로 인하여 관로가 교체되지 않을 경우 발생할 수 있는 파손 횟수가 그만큼 감소되기 때문인 것으로 분석된다.

상수도 배수관로의 경제적 분석을 위한 계획기간으로 본 논문에서는 30년을 사용하였으나, 관로교체의 영향을 줄

더 장기적으로 파악하고자 하는 경우에는 보다 더 큰 계획 기간을 사용할 수 있을 것으로 본다. 그러나 더 큰 계획 기간을 사용한다고 하더라도 본 논문에서 산정된 연간 교체 길이, 관종별 교체 길이 및 절약되는 보수비용 등과 같은 값이 바뀌는 것은 아니며, 다만 관로교체 계획의 보다 장기적인 영향을 파악하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

본 논문에서 개발된 방법론 및 컴퓨터 알고리즘과 같은 배수관망의 유지관리를 위한 의사결정시스템을 효율적으로 사용하기 위해서는 장기간 동안 구축되어온 배수관로 시스템의 관로 제원 데이터베이스와 관로파손데이터베이스가 반드시 필요하다. 우리나라의 경우 일부 지방자치단체에서는 이러한 자료를 구축해 오고는 있으나 체계적인 전산화가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 경제적이며 효율적인 상수도 배수관로 시스템의 유지관리를 위해서는 정부와 지자체가 상수관로의 유지관리와 연관된 자료의 중요성에 대한 인식을 제고하여 자료 구축의 표준을 수립하고 체계적인 전산화를 추진하여야 할 것으로 사료된다.

사 사

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

참고문헌

- 남궁은, 2001년도 주요정책추진방향, 제9회 세계 물의 날 기념 “먹는 물과 건강” 세미나집, 국립환경연구원 (2001).
- 박수원, 전환돈, 김정옥, 상수도 주철 배수관로의 파손자료 유형에 따른 파손을 모형화와 수정된 시간척도를 이용한 최적 교체시기의 산정, *한국수자원학회논문집*, **40**(1), pp. 39-50 (2007).
- American Society of Civil Engineers (ASCE), *Creating the 21st century through innovation*, American Society of Civil Engineers, Civil Engineering Research Foundation, Report #96-5016.E (1996).
- American Water Works Association (AWWA), *Dawn of the Replacement Era: Reinvesting in Drinking Water Infrastructure*, Water Industry Technical Action Fund, Denver, CO, pp. 17-18 (2001).
- Burn, L. S., Tucker, S. N., Rahilly, M., Davis, P., Jarrett, R. and Po, M., Asset planning for water reticulation systems—the PARMS model, *Water science & technology: Water Supply*, **3**, pp. 55-62 (2003).
- Deb, A. K., Herz, R. K., Hasit, Y. J. and Grablutz, F. M., *Quantifying future rehabilitation and replacement needs of water mains*, AWWA Research Foundation, Denver (1998).
- Kleiner, Y. and Rajani, B., Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models, *Urban Water*, **3**, pp. 131-150 (2001).
- Malandain J., Le Gauffre P., Miramond M., Organizing A Decision Support System For Infrastructure Maintenance: Application To Water Supply Systems, *Proceedings of the First International Conference on New Information Technologies for Decision-making in Civil Engineering*, Montreal, Canada, pp. 1013-1024 (1998).
- Office of Management and Budget, *OMB Circular No. A-94*, U.S. Executive Office of the President (1992).
- Park, S. and Loganathan, G. V., Optimal Pipe Replacement Analysis with a New Pipe Break Prediction Model, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, **16**(6), pp. 710-716 (2002).
- Rajani, B. and Kleiner, Y., Comprehensive Review of Structural Deterioration of Water Mains: Physically based Models, *Urban Water*, **3**, pp. 151-164 (2001).
- Shamir, U. and Howard, C. D. D., An analytic approach to scheduling pipe replacement, *Journal of American Water Works Association*, **71**(5), pp. 248-258 (1979).
- UtilNets, *Reliability-Based Decision Support System for the Maintenance Management of the Underground Network of Utilities*, Final Technical Report, Computer Technology Institute (1997).