

기존 상수도 노후관망의 개량 및 관리 기법의 개발 Development of Rehabilitation and Management Techniques for Old Water Distribution Systems

김 중 훈* · 김 중 우** · 이 현 동*** · 김 성 한****
Kim, Joong Hoon · Geem, Zong Woo · Lee, Hyun Dong · Kim, Seong Han

Abstract

Flow carrying capacity of water distribution systems is getting reduced by deterioration of pipes in the systems. The objective of this study is to develop a managerial decision-making model for the rehabilitation of water distribution systems with a minimum cost. The decisions made by the model also satisfy the requirements for the discharge and pressure at demanding nodes in the system. The replacement cost, pipe break repair cost, and pumping cost are considered in the economic evaluation of the decision along with the break ratio and interest ratio to determine the optimal replacement time for each pipe. Then, the hydraulic integrity of the water distribution system is checked for the decision by a pipe network simulator, KYPIPE, if the discharge and pressure requirements are satisfied. In case the system does not satisfy the hydraulic requirements, the decision made for the optimal replacement time is revised until the requirements are satisfied. The model is applied to an existing water distribution system, the Metropolitan Water Supply Project (1st Phase). The result shows that the decisions for the replacement time determined by the economic analysis are accepted as optimal and the hydraulic integrity of the system is in good condition.

요 지

상수도 관망시설에서 각 관로는 시간이 경과함에 따라 각종 부식이 일어나 통수능이 저하된다. 그러므로 적절한 시기에 갱생이나 교체 등의 처리를 해주어야 한다. 본 연구에서는 각 수요절점에서 요구수량, 요구압력 등 수리학적 조건을 만족시켜주며 동시에 최소의 비용으로 노후된 관로를 처리해주는 의사결정모형을 개발하였다. 교체비용, 관파열보수비용, 양수비용,

-
- * 고려대학교 토목환경공학과 조교수
 - ** 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
 - *** 한국건설기술연구원 환경연구실 선임연구원
 - **** 한국수자원공사 수도운영처 대리

관 파열율, 연이율 등은 각 관로의 교체시기를 경제적으로 결정하는데 이용된다. 그리고 배수시설의 수리학적 만족여부는 관망계산 프로그램 KYPIPE에 의해 점검된다. 시스템이 수리학적 조건을 만족시키지 못할 경우 교체시기는 조건이 만족될때까지 앞당겨진다. 본 모형은 기존 송배수시설인 수도권 광역상수도 제1단계에 적용되었다. 모형을 이용해 산출한 최적교체시기는 수리학적으로 모의해본 결과 문제가 없음을 알 수 있었다.

1. 서 론

인간의 생활에 있어서 가장 중요한 것중의 하나가 바로 용수이며, 이를 공급하는 물분배시스템 또한 중요한 것은 말할 나위도 없다. 그러나 시간이 경과함에 따라 물분배 시스템의 내, 외부의 여러가지 원인으로 관이 노후화되어 수리학적 통수능력이 저하되고, 전체의 물분배 시스템에 영향을 주어 수요량을 만족시키지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이에 따라 이런 문제점을 해결하기 위한 연구가 관심을 모으고 있으며, 외국에서는 이미 상당한 연구가 수행되었고, 또 진행중에 있으며 국내에서도 이런 연구에 대한 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 이러한 연구들은 물분배 시스템 내의 노후된 관의 개량이 전체의 물분배 시스템에 주는 경제적, 수리학적 영향에 중점을 두고 있다.

일반적으로 물분배 시스템 내의 노후된 관의 처리방법에는 크게 세가지가 있으며, 관의 갱생(Rehabilitation), 교체(Replacement), 유지보수(Maintenance & Repair)가 그것이다. 갱생은 관이 노후화됨에 따라 발생하는 관 내부의 부식이나 돌기 등으로 인하여 수반되는 통수능의 저하를 여러가지 방법에 의하여 내부의 이물질 제거하고 관 내벽을 피복하여 관의 수리학적 통수능력을 증가시키는 것이며, 교체는 노후된 기존의 관을 철거하고 새관을 매설하는 것으로 보통 갱생보다는 더 나은 수리학적 특성을 얻을 수 있다. 관의 유지보수는 앞의 두가지 방법을 사용하지 않고 단지 관이 누수되거나 파열되었을 때 관을 보수하는 것으로 수리학적 통수능력은 그리 향상되지 않는다.

본 논문에서는 관의 노후화로 인한 물분배 시스템의 수리학적 특성 저하를 최소의 비용으로 해결

하기 위해 관 처리의 경제성분석과 관망시스템의 수리학적 타당성 검토를 결합하였으며 기존의 이론에만 치우친 접근방법을 피하여 이론적인 근거가 있으며 실무 적용성과 국내 적용성이 높은 모형의 개발에 목적을 두었다.

지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Shamir와 Howard(1979)는 기존 관의 예측된 파손횟수, 새 관의 예측된 파손횟수, 단위 파손당 보수비용, 기존의 관을 교체하는데 소요되는 비용, 그리고 할인율(discount rate)등에 기초를 두고 관 교체시기 결정방법을 발표했다. Walski와 Pelliccia(1982)는 현재의 파손율이 어떤 한계파손율보다 높다면 그 관은 교체되어야 한다는 새로운 관교체 기준을 제시하였으며, 그들은 Shamir와 Howard(1979)의 방법이 전체적인 관망의 관교체의 결정에는 유용하나 개개의관에 대한 경제적인 교체여부 결정에 대해서는 자기들의 방법이 우수하다고 발표했다. Walski(1982, 1985)는 관망의 경제적인 갱생에 대하여 고찰하였는데, 이 분석은 관의 세척과 피복에 대한 갱생의 비용이 양수비용보다 저렴하다면 관의 통수능을 향상시켜주기 때문에 관을 갱생하는것이 더 경제적인 방법이라고 발표했다. O'Day(1982)는 관의 주된 파손원인이 관의 사용연수, 지리학적 위치, 혹은 환경의 항목으로 분석된 여러가지 연구를 제시하였는데, 그는 효율적인 관망의 유지보수, 갱생, 교체에 대한 결정은 관의 사용년수가 아닌 실제적이고 계속해서 추가되는 관망의 물리적 조건의 정보에 기본을 두어야 한다고 결론지었다. Sullivan(1982)은 물분배 시스템의 갱생, 지속적인 유지, 그리고 교체에 대한 Boston시에 적용시킨 연구에서 관의 교체나 혹은 갱생의 결정에서는 유지보수 기록, 수명기록, 수도 손실 실험, 화재시 소화전을 통한 유량실험등을 우

선적으로 고려해야 한다고 언급했다. 관을 피복을 해야 할 지, 아니면 교체할 해야 할 지에 대한 결정을 하기 위해서는 통수능의 적합성, 유지보수 연혁, 지하철 시스템의 누전으로 수반되는 관의 급격한 부식, 예측되는 미래의 문제점, 그리고 대상관망 지역의 물사용의 변화추세를 포함한 여러가지 요소를 고찰해야 한다.

물분배 시스템의 교체와 갱생에 대한 최소비용문제를 결정하는 모형은 Woodburn 등(1987), 후에 Lansey 등(1992)에 의해서 제시되었다. 이 모형은 비용을 최소화하는 동시에 수요량과 요구되는 압력수두를 맞추어 주기위한 관망의 개선에 대한 문제점을 해결해 준다. Lansey 등(1992)에 의해서 고찰된 비용은 교체비용, 피복비용, 보수비용과 에너지비용을 포함한다. Lansey 등(1992)에 의해 제시된 모형에는 각 구간마다 네개의 연속적인 변수가 있는데 그중 각 구간의 교체할 관의 직경과 길이, 각 구간의 갱생할 관 길이등 세개만이 결정 변수이고, 네번째 변수인 각 구간에서의 처리되지 않는 구관의 길이는 다른 세가지 변수의 함수이다. Woodburn 등(1987)과 Lansey 등(1992)에 의해 제시된 모형은 O.R. 개념을 사용한 관망의 갱생과 교체를 주제로 한 학문적인 모형에 지나지 않으므로, 그것은 관의 어떤부분을 교체하거나 갱생하는 데는 그리 실제적이지 못하다. Kim(1992) 및 Kim과 Mays(1994)에 의해 발표된 모형은 결정 변수로서 관 길이를 사용하는 대신에 관의 갱생과 교체의 결정을 하기위해 정수형변수(이진변수)를 사용하는 MINLP(Mixed Integer Nonlinear Programming)를 적용하였으며 이러한 최적화 개념의 도입으로 펌프시설은 물론 각 관의 교체여부와 갱생여부를 종합적으로 결정할 수 있도록 개발된 모형이다. 이 모형은 관수로 해석프로그램인 KYPIPE(Wood, 1980)를 접속하여 관망 시스템의 수리학적 해석까지도 겸하는 의사결정 모형이지만, 사용된 최적화 기법이 다룰 수 있는 변수 갯수의 한계로 말미암아 해석 가능한 관망의 규모에 제한이 있고, 관 개량의 시기를 연차적으로 계획할 수 없는 등의 단점이 있다.

이 절의 전반부에 소개된 모형들은 기술한 바와 같이 단지 현장 기록자료나 어떠한 지침을 기초로

하여 본 연구가 목표로 하는 관의 갱생, 교체와 그 처리시기를 결정하는 복합적인 의사결정에 대한 뚜렷한 기준을 제시하지 못한 모형들이며 후반부에 소개된 모형들은 너무 이론적으로 치우친 나머지 수학적인 모델링이 복잡하고 전산화가 어려우며 많은 계산시간을 요구하여 실무적용적이지 못하다. 또한 이러한 모형들은 이미 지적된 여러 문제점 외에도 우리나라의 국내 상수도 관망 시스템의 실정이나 현실성 등을 고려하지 못하여 국내의 고유상황에 적용시키기에는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실무적용적이면서 수학적인 이론의 뒷받침이 있는 의사결정 모형을 개발하고자 한다.

2. 자료의 분석

모형을 구성하는 인자를 유도하는 데 필요한 자료로는 유지보수비용자료, 갱생비용자료, 교체비용자료, 양수비용자료, 관 파열자료, 관 노후도자료 등이 있다. 갱생비용자료, 교체비용자료, 양수비용자료, 관 파열자료는 기존의 자료를 이용하여 인자를 유도하였으나 유지보수비용자료나 관 노후도자료들은 자료부족으로 인하여 인자를 직접 유도하기가 곤란하였고 따라서 유지보수비용자료는 미국공병단의 자료를 이용하였고 관 노후도자료는 단 2개의 자료로 인자를 유도하였다.

2.1 유지보수비용

유지보수비용은 한 건의 관 파열을 보수하기 위한 비용으로 관의 보수에 필요한 장비비, 노무비, 재료비 등의 기타비용을 포함하는 비용으로 관경별 함수로 표시하여 본 연구에 사용하였다. 국내에서 시행된 여러 보수공사의 공사비 산출내역으로는 관경별 보수비용을 유도하기가 곤란하여 본 연구에서는 미국 육군 공병단이 1983년에 발표한 관경별 보수비용자료를 도입, 환산하여 사용하였다.

회귀분석식은 다음과 같다.

$$C_b = 1300 \left(\frac{D}{304.8} \right)^{0.62} \times 800 \quad (1)$$

여기서 C_n 는 관 파열 한건당 보수비용(원/건) 이고, D 는 관경(mm)을 나타낸다.

2.2 갱생비용

관의 갱생방법에는 여러가지가 있으며 그 중 수집된 자료는 동도기공 주식회사에서 1994년에 산정한 Air Sand(A.S.) 공법에 의한 관경 16~155 mm의 갱생에 소요되는 비용으로 이를 회귀분석하여 비용함수를 유도하였다. 관경이 155 mm를 초과한 경우에는 외삽법(Extrapolation)을 사용하여 추정하였다.

선형회귀분석에 의한 방정식은 다음과 같다.

$$C_n = 210.187D + 9181.11 \quad (2)$$

여기서 C_n 는 단위 갱생비용이며 D 는 관경이다.

2.3 교체비용

교체비용은 한국종합기술개발공사에서 1994년 기준으로 산정한 300 mm부터 2800 mm까지의 강관의 신관매설비용 자료에 관 철거비용을 합하여 산정한 것으로 실제의 교체공사비용과는 공사시의 상황에 따라 많은 차이가 있을 수 있다.

토사구간에서의 회귀방정식은 다음과 같다.

$$C_r = 0.22526D^2 + 269.092D + 9859.21 \quad (3)$$

여기서 C_r 은 토사구간의 단위 교체비용이다.

포장구간에서의 회귀방정식은 다음과 같다.

$$C_r = 0.237566D^2 + 380.649D + 111178 \quad (4)$$

여기서 C_r 은 포장구간의 단위 교체비용이다.

2.4 양수비용

본 모형에 포함되는 양수비용은 관의 개량후에 낮아지는 수두손실량을 비용으로 환산한것으로 관의 개량후에 절약될 수 있는 전력량을 비용의 절감

으로 나타난 것이다. 이 양수비용의 계산을 위해서 한국전력공사가 1994년 발표한 산업용(을)에 해당하는 전기비용 자료를 수집하여 하루 24시간 1년 365일 양수를 할 경우 한해에 절약될 수 있는 비용을 계산하였다. 하루 24시간, 1년 365일 양수를 할 경우의 연간 전기비용은 다음 식과 같다.

$$C_p = 323770P \quad (5)$$

여기서 P 는 펌프의 동력을 나타낸다.

그런데, Hazen-Williams의 식으로 수두손실을 나타내면 다음과 같다.

$$h_L = \frac{Q^{1.852}(10.64L)}{D^{4.87}C^{1.852}} \quad (6)$$

여기서 h_L 은 수두손실(m), Q 는 유량(cms), L 은 관길이(m), D 는 관경(m), 그리고 C 는 Hazen-Williams의 상수이다.

식 (6)에 교체전의 C 값과 관의 개량후에 향상된 C 값을 대입하여 각각의 수두손실을 계산한 후 두 수두손실의 차이를 계산하고, 식 (7)을 사용하여 소요 동력을 계산하여 식 (5)에 대입하여 교체후 절약될 수 있는 연간 전기요금을 계산한다.

노후관을 교체하지 않음으로 해서 낭비되는 소요 동력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P = \gamma Q \Delta h_L \quad (7)$$

여기서 P 는 소요동력(kW)이다.

2.5 관 파열율 함수의 유도

관의 파열율 함수를 유도하기위해 한국수자원공사가 보유하고 있는 수도권광역상수도의 강관의 파열자료 33개를 분석하여 관이 매설된 이후의 경과년도별 관 파열율자료를 회귀분석, 시간에 따른 관 파열율 함수를 지수함수로 유도하였다.

파열율함수는 다음과 같다.

$$y = 3.882 \times 10^{-6} e^{0.165x} \quad (8)$$

여기서 y 는 파열율이며 x 는 관을 매설한 후 경과한 연수(년)이다.

2.6 관 내부의 노후도 예측

기존의 부족한 자료만을 가지고 관망의 전구간에 걸쳐 매설연수와 관경에 따른 관 내부 노후도 C 값을 산정하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

1단계: 각 관로의 노후도 C 값을 관경과 매설년수에 따라 적절히 가정

2단계: 가정한 C 값을 관로의 수리모의 패키지인 KYPIPE에 입력하여 수리계산을 수행

3단계: 계산 결과로 얻은 수리경사선과 과년도 관압자료로부터 얻은 수리경사선을 비교

4단계: 두 값이 비슷해질때까지 각종 계수를 변화시키며 C 값을 여러모로 가정하여 계산

5단계: 두 값이 비슷해지면 이때의 C 값 가정식에서 관경별/매설년수별 C 값을 발생시킴

6단계: 초기 C 값과 매설년수가 관의 내용년수에 도달하였을 때의 C 값을 실측

7단계: 이렇게 얻은 C 값을 매설년수와 관경을 독립변수로 놓고 다중회귀분석을 실시하여 회귀식을 도출

다중회귀분석을 실시하면 높은 적합도(상관계수의 제곱이 0.9799)를 가진 다중회귀식을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$C = 0.052Y^2 - 3.669Y + 0.015D + 119.086 \quad (9)$$

단, Y 는 매설년수(년)이고 D 는 관경(mm)이며 통계패키지는 SAS를 이용하였다.

3. 이론적 모형의 개발

3.1 기본 알고리즘

우선 경제성분석에 의하여 관망내의 각각의 관들에 대하여 최적 개량시기를 예측한다. 여기서는 식 (10)을 이용하여 각 관의 최적 교체시기를 예측할 수 있다. 각 관의 처리시기를 예측한 후에는

KYPIPE를 이용하여 분석시점부터 연차적으로 수리학적 타당성을 검토한다(김한주, 1994). 본 연구의 모형 프로그램은 FORTRAN언어를 이용하여 작성되었는데, 본프로그램에서는 최적 교체시기를 산출하고 부프로그램에서는 KYPIPE와 연계하여 수리학적 타당성을 검사하게 된다.

수리학적 적합성 검토시 관망이 요구조건을 만족시키지 못할 경우에는 경제성분석으로 결정한 관의 처리시기중 가장 빠른 관을 선택하여 향상된 C 값으로 다시 수리학적 적합성을 검토한다. 이 과정은 수리학적 요구조건이 만족될 때까지 계속 반복된다. 요구조건을 만족시키면 그 해부터 장래에 대한 관의 내부노후도를 예측하여 다음년도부터 계속적으로 수리학적 적합성을 검토한다. 이 과정들을 반복하여 계획년도까지 적합성을 검토한 후 다시 결정된 관의 처리방법과 처리시기를 순차적으로 나열한다.

3.2 관의 최적 교체시기의 결정

관의 최적 교체시기의 결정은 경제성분석에 양수 비용을 포함하여 관의 개량시에 절약될 수 있는 비용을 고려하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min}[P_T(t_r)] = & \text{Min} \left[\sum_{t=t_r}^{t_r} \frac{C_m(t)}{(1+R)^{t-t_p}} \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{C_r}{(1+R)^{t_r-t_p}} - \sum_{t=t_r}^{t_p+t_d} \frac{C_p}{(1+R)^{t-t_p}} \right\} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

여기서 t_r 은 최적 교체시기이고, $P_t(t_r)$ 은 그 때의 비용이며, t_p 는 현재시점, t_d 는 계획기간, C_m 은 연간 파손보수비용, C_r 은 관교체비용, C_p 은 교체후 절감되는 연간양수비용, R 은 할인율이다.

4. 모형의 실제관망에의 적용

4.1 관망의 선정

선정된 관망은 수도권 광역상수도 1단계 관망 (수도권 광역상수도(1단계) 타당성조사 및 기본계획 보고서, 1993)으로 하루 최고 1,200,000 톤을 공급할 수 있는 매우 큰 관망이다. 모형의 적용을 위한 유량으로 두가지를 선정하였는데, 하나는 광역상수도 1단계 관망의 설계배분량이며 또 하나는 평상시의 유량으로 1994년 9월 13일의 공급량을 선정하였다.

4.2 대상관망의 제원

절점은 고정수두 절점을 포함하여 모두 38개의

절점이 있으며 이중 수요절점은 모두 8개이다. 그리고 팔당취수장에 해당하는 고정수두 절점의 수면 표고는 87.7 m이다. 광역상수도 1단계 관망내의 관들은 절점을 기준으로 모두 43개의 관으로 구분하였다. 관경은 1500 mm부터 2800 mm까지 다양하며 3500 mm 직경의 터널이 세곳에 있다. 모의실험에서는 터널을 강관으로 가정하여 해석하였다. 수도권 광역상수도 1단계 관망에는 모두 두곳에 펌프장이 있으며, 하나는 팔당취수장과 1번 절점을 연결하는 1번관에 설치된 팔당 취수펌프장이며, 또하는 29번 절점과 30번 절점을 연결하는 36번관에 설치된 김포가압장이다.

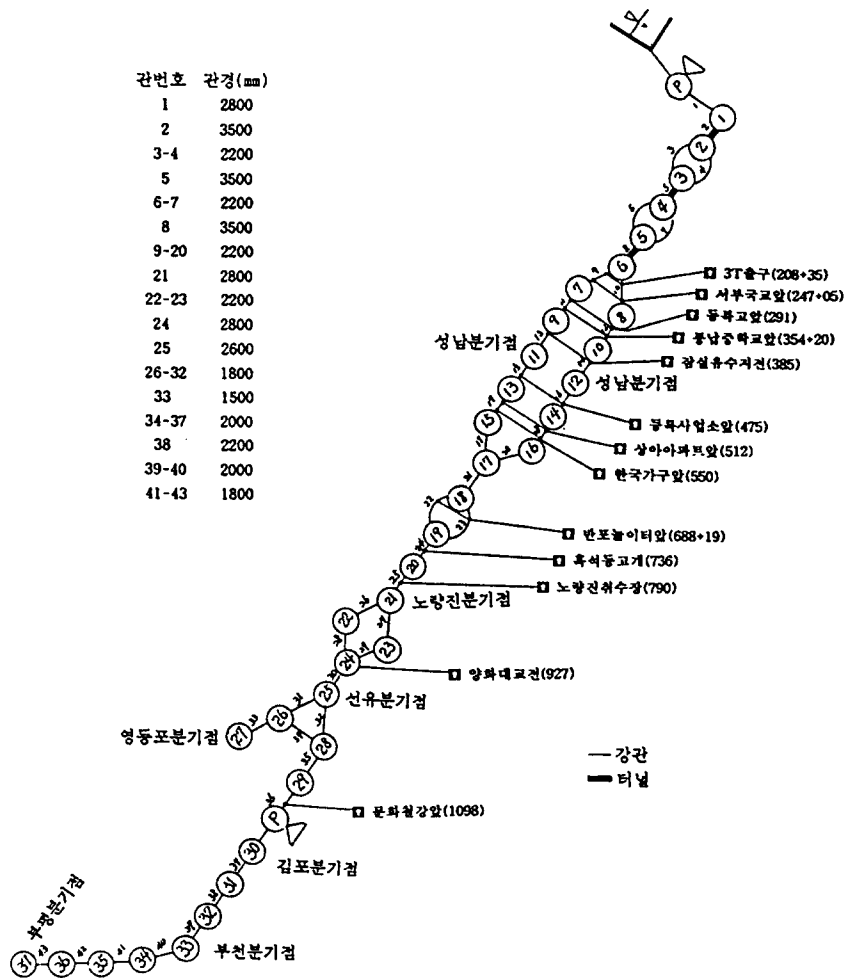


그림 1. 수도권 광역상수도 1단계 관망 모식도

4.3 관망에 대한 각종 가정

이자율은 경제성분석에 의한 처리시기의 결정에 있어 비용함수와 함께 중요한 요소이다. 모의실험에서는 0.14로 이자율을 가정하였다. 단수로 인한 피해비용은 갑작스런 관의 파열로 인하여 단수가 될 경우에 발생하게 되고 관 보수비용에 포함시키게 되는데 이에 대한 정확한 산정이 불가능하여 임의로 2억원으로 가정하여 모의실험하였다.

수도권 광역상수도 1단계 관망에는 직경 3500

mm의 터널이 모두 세개가 있는데 본 모의실험에서는 이 터널들도 강관으로 가정하였으며 교체비용의 산정과 관 파열율의 예측에 강관에 적용된 식을 그대로 사용하였다. 수리학적 적합성의 판단에서 주된 검토대상은 절점의 압력인데 이 절점압력의 최소치를 1.5 kg/cm²로 가정하였다.

4.4 적용 결과

표 1과 2는 최대 유량이라 할 수 있는 설계배분량과 어느 하루 유량의 두가지 유량을 적용하여

표 1. 모의실험결과(설계 배분량)

관 번호	교체시기	교체비용(원)	전체소요비용(원)
1	2011	531,330,400	1,573,803,520
2	2014	1,191,706,496	4,082,490,368
3	2009	366,081,504	1,046,489,664
4	2009	366,081,504	1,046,489,664
5	2014	240,926,512	825,354,304
6	2009	801,968,000	2,292,525,568
7	2009	801,968,000	2,292,525,568
8	2014	232,309,168	795,833,472
9	2009	878,090,240	2,510,130,432
10	2009	878,090,240	2,510,130,432
11	2009	1,036,020,096	2,961,592,832
12	2009	1,036,020,096	2,961,592,832
13	2009	603,292,224	1,724,585,984
14	2009	603,292,224	1,724,585,984
15	2009	931,918,464	2,652,018,432
16	2009	931,918,464	2,652,018,432
17	2011	1,003,532,288	3,028,743,936
18	2011	1,003,532,288	3,028,743,936
19	2011	851,034,752	2,568,493,568
20	2011	851,034,752	2,568,493,568
21	2016	33,867,924	111,824,664
22	2011	388,622,816	1,172,895,872
23	2011	388,622,816	1,172,895,872
24	2016	474,150,944	1,565,545,216
25	2015	180,723,808	577,383,936
26	2012	466,813,280	1,467,356,928
27	2012	466,813,280	1,467,356,928
28	2012	297,063,008	933,772,608
29	2012	297,063,008	933,772,608
30	2008	31,242,416	134,477,232
31	2012	83,320,824	252,243,776
32	2012	83,308,608	252,231,552
33	2011	107,202,688	335,178,944
34	2013	7,232,266	21,942,494
35	2013	570,547,072	1,789,394,688
36	2013	452,502,816	1,419,175,040
37	2013	40,162,188	124,220,640
38	2009	222,198,048	617,879,744
39	2008	91,552,168	245,046,272
40	2008	34,971,640	92,934,448
41	2007	568,566,272	1,472,598,656
42	2007	1,301,685,248	3,371,392,256
43	2007	905,653,632	2,345,661,952
합 계		23,976,000,000	66,724,000,000

표 2. 모의실험결과(1994년 9월 13일 공급량)

관 번호	교체시기	교체비용(원)	전체소요비용(원)
1	2011	541,332,608	1,583,805,696
2	2014	1,194,079,872	4,084,863,744
3	2009	373,797,568	1,054,205,696
4	2009	373,797,568	1,054,205,696
5	2014	241,406,336	825,834,176
6	2009	818,871,424	2,309,428,992
7	2009	818,871,424	2,309,428,992
8	2014	232,771,824	796,296,128
9	2009	896,598,144	2,528,638,208
10	2009	896,598,144	2,528,638,208
11	2009	1,057,856,768	2,983,429,376
12	2009	1,057,856,768	2,983,429,376
13	2009	616,008,064	1,737,301,888
14	2009	616,008,064	1,737,301,888
15	2009	949,585,536	2,669,685,504
16	2009	949,585,536	2,669,685,504
17	2011	1,020,695,744	3,045,907,456
18	2011	1,020,695,744	3,045,907,456
19	2011	865,590,016	2,583,048,960
20	2011	865,590,016	2,583,048,960
21	2016	34,239,376	112,196,112
22	2011	395,269,440	1,179,542,528
23	2011	395,269,440	1,179,542,528
24	2016	479,351,264	1,570,745,600
25	2015	185,062,672	581,722,880
26	2012	476,578,560	1,477,122,176
27	2012	476,578,560	1,477,122,176
28	2012	303,277,248	939,986,816
29	2012	303,277,248	939,986,816
30	2008	48,551,072	151,785,888
31	2012	83,800,072	252,723,040
32	2012	83,784,728	252,707,680
33	2011	109,396,432	337,372,704
34	2013	7,228,826	21,939,056
35	2013	569,748,864	1,788,596,480
36	2013	451,869,760	1,418,542,080
37	2013	40,187,776	124,246,232
38	2009	222,276,368	617,958,080
39	2008	91,623,592	245,117,696
40	2008	34,984,328	92,947,128
41	2007	569,053,888	1,473,086,336
42	2007	1,302,801,664	3,372,508,672
43	2007	906,430,336	2,346,438,912
합 계		23,976,000,000	67,068,000,000

25년간 모의실험한 최종결과를 나타내고 있다. 표 1과 2의 첫번째 열은 관로번호이고 두번째 열은 경제성 분석을 통해 얻은 각 관로의 최적 교체시기이며 세번째 열은 교체비용, 네번째 열은 교체시기까지의 유지보수비용과 교체비용을 합하고 교체를 통해 절감될 수 있는 양수비용을 뺀 전체소요비용이다. 두가지 유량으로 나누어 적용해 본 결과, 두 경우 공히 대상 관망 내부의 노후도 감소정도가 전체 관망에 미치는 영향이 미비하여 계획기간 동안은 관망이 수리학적으로 별다른 문제가 없었고 따라서 경제성분석에 의하여 결정된 최적 교체시기를 변경할 필요가 없었다. 즉 기준치보다 낮은 압력이 발생하는 절점이 없어 관 교체시기를 앞당길 필요가 없으므로 두 경우 모두 경제성분석에 의하여 결정된 교체시기에 변화가 없다.

그런데 표 1과 같이 설계배분량으로 계산했을때의 전체소요비용은 667억정도인데 표 2와 같이 어느 평일의 유량으로 계산했을때의 전체소요비용은 671억으로 비용에 있어 수억정도가 차이난다. 차이가 나는 이유는, 관을 교체하게 되면 그 만큼 통수능이 증가하여 펌핑비용이 감소하게 되는데 이 절감비용을 전체비용에서 빼주기 때문에 유량이 클수록 절감분도 커지게 되며 따라서 표 1에서 더 많은 비용절감을 가져오게 되는 것이다.

5. 결 론

본 연구는 노후화된 관로 시스템의 최적 관개량을 위한 의사결정 모형의 개발을 목적으로 하였다. 개발된 모형은 물분배 시스템 내의 각각의 관에 대하여 경제성분석을 실시하여 처리시기를 결정하고, 관의 내부 노후도를 예측한 후 이 결과를 수리모의 모형인 KYPIPE 에 입력시켜 수리학적 타당성을 검토하는 것이 주된 알고리즘이다.

본 의사결정 모형은 관 처리방법의 선택과 펌프의 용량결정 등을 주로 고려한 기존의 몇몇 모형과는 달리 물분배 시스템의 수리학적 타당성을 고려하며 또한 경제성분석에 의하여 최소의 비용이 소모되는 최적 처리시기를 결정하는 연차적인 의사결정이 가능한 모형이다. 본 의사결정 모형의 적용에 필수적인 자료에는 각종 비용함수, 관의 시간에 따

른 파열률 함수 등이 있으며 관의 내부 노후도 예측 또한 필수적이다. 비용함수는 관경별 소요비용 자료를 수집하여 회귀분석하였고, 관 파열률 함수는 수도권 광역상수도 내의 파열자료와 관로현황 자료를 이용하여 유도하였다. 본 모형에서 사용하는 관의 내부노후도의 지표는 Hazen-Williams의 상수 C이며, 현재 국내에서 구할 수 있는 유량 및 압력측정 자료의 부족으로 이에 대한 정확한 산정이 어려워 미비한 자료로 C값을 산정하는 새로운 방법을 제시하여 계산하였다.

본 모형을 수도권 광역상수도 1단계 관망에 적용시켜 본 결과 현재의 1단계 관망은 수리학적으로 문제가 없어 경제성분석에 의하여 결정된 최적 교체시기를 각 관의 처리시기로 결정하는 것이 수리학적으로도 타당하며 비용을 최소화 할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 물론 현재 실제로 1단계 관망을 운영하는 과정에서 관로파손사고가 발생하는 데 사고분석을 통해서 관로의 노후에 미치는 인자를 더욱 실제적으로 고려해주고 계속적으로 모형을 수정해 나가야 할 것이다. 본 연구에 의하여 개발된 의사결정모형은 기존의 모형과 비교하면 이론의 전개가 그리 어렵지 않으며 전산기를 이용한 계산 시간이 짧아서 실무에 적용하기가 유용하므로 노후된 관의 처리여부를 결정하는 방법에 대한 좋은 지침이 될 수 있다고 본다.

본 연구의 수행중에 그동안 축적된 현장자료가 많지 않음을 통감하게 되었는데, 향후 대상관망의 관압, 유량, 및 수질에 대한 정확한 자료를 축적, 이용하여 관 내부노후도를 예측하고, 추가적으로 관의 파열률함수 역시 더 많고 자세한 현장기록을 축적하여 분석한다면 모형의 정확성과 실무적용성은 더욱 높아질 것이다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단 연구비지원(과제번호 941-1200-003-2)에 의한 결과로서 지원당국에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김한주(1994). “물분배시스템의 최적 관개량 의사결정 모형에 관한 연구,” 석사학위논문, 고려대학교.
- 수도권 광역상수도(1단계) 타당성조사 및 기본계획 보고서. (1993). 건설부.
- Kim, J.H. (1992). “Optimal rehabilitation/replacement model for water distribution systems,” Ph. D. dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Kim, J.H., and Mays, L.W. (1994). “Optimal rehabilitation/replacement model for water distribution systems.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 674-692.
- Lansey, K.E., Basnet, C., Mays, L.W., and Woodburn, J. (1992). “Optimal maintenance scheduling for water distribution systems.” *Civil Engineering Systems*, England.
- O'Day, D.K. (1982). “Organizing and analyzing leak and break data for making main replacement decisions.” *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 74, No. 11, pp. 589-594.
- Shamir, U., and Howard, C.D. (1979). “An analytic approach to scheduling pipe replacement.” *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 71, No. 5, pp. 248-258.
- Sullivan, J.P., Jr. (1982). “Maintaining aging systems: Boston's approach.” *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 74, No. 11, pp. 555-559.
- Walski, T.M. (1982). “Economic analysis of rehabilitation of water mains.” *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 108, No. WR3, pp. 296-308.
- Walski, T.M. (1985). “Cleaning and lining versus parallel mains.” *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, Vol. 111, No. 1, pp. 43-53.
- Walski, T.M., and Pelliccia, A. (1982). “Economic analysis of water main breaks.” *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 74, No. 3, pp. 140-147.
- Wood, D.J. (1980). *Computer analysis of flow in pipe networks including extended period simulations (KYPIPE user's manual)*.
- Woodburn, J., Lansey, K.E., and Mays, L.W. (1987). “Model for the optimal rehabilitation and replacement of water distribution system component.” *Proceeding of the 1987 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, Williamsburg, Virginia, pp. 606-611.

〈접수: 1996년 2월 1일〉