

## 상수관로의 노후도 예측에 근거한 최적 개량 모형의 개발 ( I )

- 이론 및 모형개발 -

### Development of Optimal Rehabilitation Model for Water Distribution System Based on Prediction of Pipe Deterioration ( I )

- Theory and Development of Model -

김 응 석\*

Kim, Eung Seok

---

#### Abstract

The method in this study, which is more efficiency than the existing method, propose the optimal rehabilitation model based on the deterioration prediction of the laying pipe by using the deterioration survey method of the water distribution system. The deterioration prediction model divides the deterioration degree of each pipe into 5 degree by using the probabilistic neural network. Also, the optimal residual durability is estimated by the calculated deterioration degree in each pipe and pipe diameter. The optimal rehabilitation model by integer programming base on the shortest path can calculate a time and cost of maintenance, rehabilitation, and replacement. Also, the model is divided into budget constraint and no budget constraint. Consequently, the model proposed by the study can be utilized as the quantitative method for the management of the water distribution system.

**Keywords** : optimal rehabilitation, probabilistic neural network, optimal residual durability, shortest path

---

#### 요 지

본 연구에서는 상수관의 개량사업을 보다 효율적으로 실시 할 수 있는 방법으로 국내 실정에 적합한 상수관로의 노후도 조사방법을 이용하여 매설된 관의 노후도를 예측 근거한 최적 개량 모형을 제시하였다. 노후도 예측 모형은 확률론적 신경망 이론을 바탕으로 관별 노후도 정도를 5개 등급으로 구분하며 산정된 관별 노후도 등급 및 관경을 바탕으로 최대 잔존수명을 산정하였다. 최적 개량 모형은 관의 유지보수, 갱생, 교체의 시기 및 비용을 산정하는 것으로 최단경로흐름을 응용한 정수계획법을 이용하여 제시하였다. 또한 개발된 최적 개량 모형은 보다 현실적인 모형을 구축하기 위해 예산제약 유무에 따라 2가지 구분하여 모형을 제시하였다. 따라서, 본 연구에서 제안된 모형은 상수관로의 관리를 위해 보다 정량적인 방법으로 활용할 수 있을 것이다

**핵심용어** : 최적 개량, 확률론적 신경망, 최대 잔존수명, 최단경로흐름

---

\* 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 선임연구원

Senior Researcher, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University, Seoul 136-701

(E-mail : hydrokes@empal.com)

## 1. 서론

상수관로의 내부는 수송능력 측면에서 초기에는 계획 통수능을 유지하지만 시간이 경과함에 따라 녹의 발생이나 내부부식으로 인하여 거칠어지고 통수단면적이 감소하게 된다. 이 때문에 수리학적 통수능력이 저하되어 처음과 같은 양의 수돗물을 수송하기 위해서는 펌프 능력의 증가가 요구되고, 그렇지 못할 경우 수압저하로 인하여 급수불량지역이 발생한다. 따라서, 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 수도관리자는 항상 점검하여 누수나 파손 등 관의 현재 상태를 파악하고 문제발생에 신속하게 대응하고 문제발생을 예측할 수 있어야 한다. 그러나 국내의 노후관 개량사업은 정량적인 방법이 아닌 매설년도를 기준으로 현재 대부분의 지방자치단체 상수도 사업소에서 개량 사업을 실시하고 있으므로 우리나라의 경우에는 노후관의 판정을 매설년도만을 기준으로 적용하고 있음을 알 수 있다. 또한, 국내 상수관로의 상태 및 평가, 파손이나 누수의 원인에 대한 조사 및 연구실적은 현재 미미한 실정이며, 유지 및 관리 측면에서 실무에 활용한 경우는 지방자치단체의 수도사업소별로 각기 다른 형태의 자료로 정리 및 분석을 수행하고 있는 실정이다. 따라서 상수관로의 효율적 유지관리 및 경제적 관리를 위해 적용할 수 있는 노후관로의 최적개량 모형 개발이 필요하다.

지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Shamir 등(1979)은 관 보수와 교체비용에 관련된 기존관의 예측된 파손횟수와 새 관으로 부터 예측된 파손횟수, 단위 파손당 보수비용, 부설교체비용 그리고 할인율을 기초로 전체적인 관망의 경제적 교체시기 결정방법을 발표했다. Clark 등(1982)은 미국의 수도자료를 이용하여 관경, 관재료, 관내수압, 토양의 부식성, 토지이용 등의 인자에 의해 관 파손사고의 발생을 설명하는 다중회귀식을 구하였으며 관로의 노후도를 첫 번째 보수를 기준으로 하여 두단계로 나누었다. 관로 준공 후 첫 번째 보수까지는 경과년수에 관한 다중회귀식과, 첫 번째 파열에서 관측기간동안 관 보수의 회수에 관한 다중회귀식을 제안하여 관파열에 관하여 개선하였다. 즉, 회귀식을 통하여 다음 파괴시점까지의 예상시간을 구하는 것이다.

Walski(1982, 1985)는 관망의 갱생에 대한 경제성 분석에서 관의 세척과 라이닝 등의 갱생비용이 양수비용보다 저렴하다면, 관의 통수능을 향상시켜 주기 때문에 관을 갱생하는 것이 더 경제적인 방법이라고 제시하

였다. Andreou 등(1987)은 Clark(1982)와는 다르게 노후된 관망의 파열에 관한 확률로 나타내었다. 관의 특성과 주위환경에 따른 여러 인자를 고려하여 관의 파손 횟수와 다음 관의 파괴 확률을 예측하는 것이다. Duan 등(1992)은 Andreou(1987)의 모형에 근본이 된 semi-Markovian model을 연구하였다. semi-Markovian model은 노후도를 경과년수와 관의 이전 파손 횟수의 함수를 이용하여 최적의 관의 보수와 교체 정책을 구하는 것이다. Kim 등(1992, 1994)은 기존의 교체시기 모형연구와 같이 산정변수로서 관의 길이를 사용하는 대신에 관의 갱생과 교체의 산정을 하기 위해 정수(integer) 변수를 사용하는 MINLP(mixed-integer nonlinear programming)를 적용하였으며, 이러한 최적화개념의 도입으로 펌프시설은 물론 각 관의 교체와 갱생여부를 통합적으로 산정할 수 있는 모형을 개발하였다.

이현동 등(1994)은 관로의 내·외부에 발생하는 각종 노후도 인자를 대상으로 수도관로 노후도 판정기법인 점수평가법을 제시한 바 있으며, 한국수자원공사(1995)에서는 노후도와 관련된 각 인자들의 상황의 양호정도에 따라 점수를 부여하고 각 인자항목의 점수를 합산하여 우선적으로 정비해야 할 관을 찾는 점수평가법으로 우리나라 실정에 맞는 모형을 연구 발표하였다. 이 연구는 노후화가 전혀 없는 관에 100점이라는 기준을 주었고 노후화에 영향을 미치는 각종인자들이 노후화 정도에 차지하는 비율에 따라 각각의 비율로 점수를 부여하였다. 그리고 대상관의 현재상태에 따라 각 인자에 대한 점수를 산출하고 이것을 합산한 점수로 관의 노후도를 평가해 60점을 기준으로 보수의 여부를 판단한 것이다.

김중훈 등(1996)은 관의 노후화로 인한 물분배 시스템의 수리학적 특성 저하를 최소의 비용으로 해결하기 위해 관 처리의 경제성분석과 관망시스템의 수리학적 다당성 검토를 결합한 모형을 개발하였다. Halhal 등(1997)은 유전자 알고리즘인 Messy Genetic을 이용하여, 관망의 수리학적 함수, 물리적 건전도 함수, 수질 함수, 비용함수 등을 이용하여 관망의 매설년수에 따른 최적 개량시기를 제시하였다. 전왕규(1998)는 GIS를 이용하여 상수관의 각종 자료를 데이터베이스(DB)화하고 여기에 상수도관의 기존 점수평가 모형을 이용하여 이들에 대한 안전상태를 수치로 예측, 진단하고 안전도를 평가할 수 있는 시스템을 개발하였다. Kleiner 등(1998)은 관의 개량기준에 있어 크게 관 내·외부의

영향인자로 구분하여, 내부인자를 매설년수에 따른 수리학적 침투와 외부인자를 관의 구조적 안전을 기준으로 하여 최적의 갱생 및 교체시기를 Shamir 등(1979)이 제시한 비용함수를 이용하여 산정하였다.

이창용 등(2000)은 한국수자원공사(1995)의 점수평가모형의 일부를 새로운 알고리즘을 이용하여 개선하고, 특정 개체 및 집단을 분류함에 있어 비선형적인 경계를 결정할 수 있는 확률론적 신경망(probabilistic neural networks) 알고리즘을 이용하여 노후도의 정도에 따라 노후된 상수도 관의 교체와 갱생의 우선 순위를 판단할 수 있는 모형에 관한 연구를 수행하였다. 환경부(2001)는 국내 광역시를 대상으로 유수율 제고와 효율적 관망도 관리를 위해 GIS 도입 및 관망의 block system을 구축하여 블록별 누수관리가 가능하도록 누수율 분석방법 및 유압계 및 수압계 설치요령 등에 대하여 검토하였다. 김용석 등(2002)은 이창용 등(2000)이 제시한 모형을 보다 국내 실정에 적합하게 적용하기 위해 배수관을 중심으로 수집자료 및 분석방법을 제시하였으며, 또한 이를 바탕으로 노후도 인자 및 가중치를 산정하였다. 기존의 상수관로의 연구는 관의 개량계획 수립에 있어 관의 노후도 정도를 매설년도, 조도계수(C값), 등의 몇 가지 인자를 기준으로 최적의 개량 계획을 수립하였다. 그러나 상수관로는 지역 및 주변환경 등에 따른 다양한 인자로 인해 노후도가 진행되므로 실제 노후도 정도를 파악하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 매설된 관의 노후도를 국내 실정에 적합한 모델을 제안하여 이에 따른 최적의 관의 개량 계획을 수립할 수 있는 모형을 제시하고자 하였다. 즉, 매설된 관의 노후도 정도를 파악할 수 있는 모형을 제안하여 관의 노후도 정도를 파악하고 이에 따른 관의 최대 잔존수명을 산정하여 이를 기준으로 하여 관의 최적 개량 계획을 수립할 수 있는 모형을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

기존의 연구동향에 보듯이 관의 최적개량 계획은 단지 매설된 관의 현재 상태를 몇 가지 인자를 이용하여 이를 기준으로 개량계획을 수립하였다. 그러나 본 연구에서 제시하는 모형은 보다 정량적으로 매설된 관의 노후도를 산정하고 이를 근거로 하여 최적의 개량계획을 수립할 수 있는 모형을 구축하기 위하여 두 가지 모형을 제안하였다. 즉, 매설된 관의 노후도 산정할 수 있는 노후도 예측모형은 이창용(2000) 등이 제안한 확률론적 신경망을 이용하여 노후도 정도를 산정하였다. 또한 노

후도 등급에 따른 결과를 바탕으로 국내 수도사업소에 근무하는 실무자들의 판단하는 관의 최대 잔존수명을 가정하였다. 최적 개량 모형은 최적경로 흐름(shortest path)을 응용한 정수계획법(integer programming)을 이용하여 관의 최대 잔존수명에 따른 교체, 갱생, 유지 보수 등의 최적의 개량 시기를 산정하였다.

### 2.1 노후도 예측 모형

#### 2.1.1 기존 모형의 장·단점 분석

상수관로의 노후도를 예측하는 모형은 크게 2가지로 회귀모형(regression model)과 점수평가법(numerical weighting system)으로 구분 할 수 있다. 회귀식모형은 외형적 형태가 상관관계식으로 나타나며 모형에 포함된 인자항목은 대략 5~6개 이하인 것이 일반적이다. 모형에 포함된 인자들의 자료를 수집하여 회귀식에 대입하면 관의 노후도를 최초파손까지의 연수 또는 연간 파손건수 등으로 예측하도록 되어 있다. 점수평가법은 관의 노후도에 미치는 인자들은 15~20개 이상 포함하며, 각 인자들의 상관도 및 노후도에 미치는 영향에 따라 배분된 점수를 수도관의 주변상황에 맞추어 분배하며 대상 관로를 구성하는 각 관의 상대적 노후도를 점수로 수치화하게 된다.

회귀모형은 노후도를 예측하기 위하여 사용하는 인자의 종류가 적어서 자료의 수집과 운용이 점수평가법보다 간편하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 회귀모형은 축적된 자료를 통계적 회귀분석에 의하여 인자간 상관도와 중요도를 판정하므로 우리나라와 같이 자료의 축적이 미비한 경우이거나 혹은 신뢰성이 적은 자료를 활용하여 모형을 개발하게 되면 실제 상황을 전혀 반영하지 못하는 모형이 될 위험성이 매우 높다. 이에 비하여 점수평가법은 20여 개의 관련 인자들을 서로 연관시켜서 노후도의 진행정도를 평가하므로 각 인자들의 영향이 서로 보완되고 중첩되면서 1~2개 인자의 오차가 전체적인 평가를 좌우하는 위험을 줄일 수 있다. 점수평가법은 실제 활용 면에서 개발된 모형을 현장에 적용하며 축적되는 자료를 이용하여 모형을 수정 또는 보완하여 효율성을 증진시키는 것도 훨씬 수월하며, 통계적인 전문성보다는 경험이 풍부한 실무자가 잘 활용할 수 있는 평가 방법이다.

확률론적 신경망 모형은 기존의 신경망 모형을 응용한 한 것으로 지도판독, 특정 개체 구분과 같은 임의 집단에서 특정 값을 분류하는 모형으로 현재까지 소개되었다. 따라서 본 연구에서는 점수평가 모형의 특정

표 1. 노후도 예측 모형의 장·단점 비교

구분	장점	단점
회귀 모형	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 입력자료가 간단</li> <li>• 모형 적용이 간편</li> <li>• 단순회귀식으로 표현 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 많은 실측자료 수집이 필요</li> <li>• 국내의 경우 자료부족으로 적용 곤란</li> <li>• 다른 지역에 일방 적용 곤란</li> </ul>
점수평가 모형	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 평가항목수의 제약이 없음</li> <li>• 모형 적용이 간편</li> <li>• 지역적 특성 고려 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 많은 노후도 인자 결정이 필요</li> <li>• 일정점수를 기준으로 한 선형분류</li> <li>• 노후도의 기준이 되는 특정 점수 할당 기준이 불분명</li> </ul>
확률론적 신경망 모형	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특정 점수 할당 기준이 불분명한 부분을 개선</li> <li>• 선형분류가 아닌 비선형 분류</li> <li>• 노후도 항목별 가중치 조절에 따른 적용의 유연성</li> <li>• 노후도 등급에 따른 수치적 근거 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 입력자료가 복잡</li> <li>• 모형 적용이 복잡</li> <li>• 이론 및 수식전개가 불편</li> <li>• 입력 자료의 노후도 항목 및 가중치 산정</li> </ul>

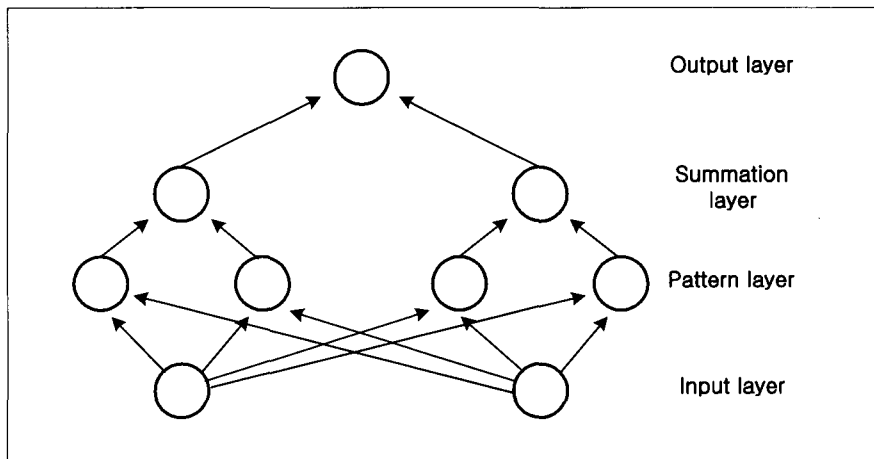


그림 1. Specht(1990) 확률론적 신경망 구조

점수에 의한 노후도 판정의 불분명한 값에 대한 근거를 제시할 수 있는 모형으로 제시하고자 하였다. 또한 확률론적 신경망을 이용한 노후도 예측 모형은 대상지역의 노후도 항목 및 가중치 값을 적절히 산정할 수 있다면 보다 쉽게 다른 대상 지역에 본 모형을 적용할 수 있는 유연성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이창용 (2000) 등이 제시한 확률론적 신경망 모형을 이용한 노후도 예측 모형을 국내 현실에 적합한 노후도 인자 및 가중치를 산정하여 적용하였다. 한편, 상기와 같은 각종 노후도 예측 모형의 장·단점을 정리하면 표 1과 같다.

### 2.1.2 확률론적 신경망

(Probabilistic Neural Network) 기초  
 확률론적 신경망 이론은 Specht(1990)에 의해 처음으로 제안되었으며, 어떠한 모집단을 개체가 가지고 있는 특성에 따라 여러 개의 계급으로 분류할 때 일반적인 신경망에서 주로 사용되는 시그모이드 함수 (sigmoid activation function)를 지수함수로 대체함으로써 비선형적인 경계를 결정할 수 있는 확률론적 신경망(probabilistic neural network)을 연구하였다. Specht(1990)는 어떠한 입력자료의 패턴도 계급으로 분류할 수 있는 입력층, 은닉층, 합산층, 출력층으로 구성된 신경망을 제안하였고 그 층에 있는 신경(neuron)

들이 전체적으로 평행하게 작동하게 한 결과, 문제 해결의 계산속도도 역전파 알고리즘(back-propagation)보다 빠르게 수렴하도록 하였다. 다음 그림 1은 Specht (1990)의 확률론적 신경망 구조는 네 개의 층을 보여 주고 있다.

이 모형의 구조는 두 개의 입력층, 두 개의 계급(class)과 그리고 각각의 계급속에 두 개의 학습경우(training case)가 있다. 학습층(pattern layer)은 각각의 학습경우에 대해 하나의 신경(neuron)을 가지고 있다. 또 합산층(summation layer)은 각 계급에 대해 하나의 신경을 가지고 있다.

실행은 입력 벡터(vector)를 모든 학습층에 동시에 전달하면서 시작되어 각 학습신경(pattern neuron)은 각각의 신경을 나타내는 학습경우(training case)와 입력 벡터와의 거리를 측정 계산한다. 그런 다음 측정된 거리를 신경의 활동 함수(activation function)에 종속시킨다. 합산층은 알맞은 임무를 가지고 있는 합산단위(summation unit)를 포함하고 있다. 각각의 합산 신경은 하나의 계급을 전담하고 있다. 또 그것은 합산 신경의 계급의 일원에 대응하는 학습층을 단순히 합하게 되는 것이다.

합산의 활동을 마친 신경은 모집단의 밀도함수 값으로 나타내어진다. 마지막으로 출력 신경(output neuron)은 단순히 분류기능을 하게된다. 그것은 합산 단위가 가장 큰 것부터 입력을 결정하게 된다. 확률론적 신경망 구조는 정밀하지만 만약에 학습단위(pattern unit)가 평행하게만 작동할 수 있다면 아주 빠른 실행능력을 가질 수 있다.

### 2.1.3 확률론적 신경망의 구조

확률론적 신경망은 Bayes의 분류 방법에 기초를 두고 있다. Bayes의 분류법을 간단한 예를 가지고 설명하면 다음과 같다. 기초적인 확률적신경망은 모든 계급들에 대해 동일한 요소(factor)  $\sigma$ 를 사용한다. 이  $\sigma$ 는 모든 밀도에서 일정한 요소의 역할을 한다. 따라서 분류의 목적으로 그것은 밀도 표준화 요소와 함께 무시될 수 있다. 유선형적인 분류 함수(streamlined classification function)는 일반적인 식의 형태를 줄일 수 있으며 이것이 확률적 신경망에서의 밀도함수인 것이다.

확률론적 신경망은 Bayes의 분류 방법에 기초를 두고 있으며, Bayes의 분류법을 간단한 예를 가지고 설명하면 다음과 같다. 기초적인 확률론적 신경망은 모든

계급들에 대해 동일한 요소(factor)  $\sigma$ 를 사용한다. 이  $\sigma$ 는 모든 밀도에서 일정한 요소의 역할을 한다. 따라서 분류의 목적으로 그것은 밀도 표준화 요소와 함께 무시될 수 있다. 유선형적인 분류 함수(streamlined classification function)는 일반적인 식의 형태를 줄일 수 있으며 이것이 확률론적 신경망에서 밀도함수인 것이다.

$$g(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n W(\|x - x_i\|) \quad (1)$$

식 (1)에서  $g(x)$ 는 밀도함수,  $n$ 은 자료의 개수이고,  $W$ 는 가중함수,  $\|x - x_i\|$ 는 Euclidean 거리로서 임의로 사용할 수 있다. 하지만 다른 거리측정도 가능하나 거의 사용되지 않는다. 정확한 점근적인 결과를 얻기 위하여 거리함수(distance function)와 가중함수(weighting function)가 합성되어야만 하는 요소들의 목록을 자세히 구하였다. 가장 평범한 가중함수에는 다음과 같이 표시되는 비정규분포 가우시안(Gaussian)이 있다.

$$W(d) = e^{-d^2} \quad (2)$$

식 (2)에서  $W$ 는 가중함수이고,  $d$ 는 거리함수이다. 이 가우시안 분포는 많은 이점을 가지고 있다. 그것은 아주 평평한 꼭대기를 가지고 있어 임의 점의 영향을 모든 범위까지 전달할 수 있다. 이것은 표본들이 거리의 영향을 소모하는 것을 방지한다. 가우시안 함수는 긴 역사를 가지고 있고 가장 일반적으로 추천 받고 있다. 이 가우시안 분포의 한가지 약점은 이 지수함수의 계산에 때때로 너무 많은 시간이 걸린다는 것이다. 이에 따른 합리적인 대안으로는 다음과 같은 식 (3)이 있다.

$$W(d) = \frac{1}{1 + d^2} \quad (3)$$

식 (3)에서  $W$ 는 가중함수이고,  $d$ 는 거리함수이다. 이 대안의 kernel 은 가우시안보다 훨씬 빨리 계산될 수 있다. 그러나 그것은 상대적으로 최대값을 가지고 있고, 각각의 표본을 지나치게 강조하고 있다. 더 나쁜 것은 아주 긴 꼬리(tail)를 가지고 있다는 것이다. 이 엄격함이 중요한 것인지 아닌지 하는 것은 문제에 따라 달라지며, 이것의 엄격함은 학습집단(training set)들이 크기가 작을수록 더 증가하는 경향이 있다.

## 2.2 최적 개량 모형

### 2.2.1 기존 모형의 장·단점 분석

노후관의 개량계획 모형은 크게 대응적 진단과 예측적 진단으로 구분하여 계량계획을 시행할 수 있다. 대응적 진단은 관이 노후되어 누수나 파손이 발생한 관로를 보수한 직후에 작성되는 보고서와 보수지도 및 유지관리 이력을 바탕으로 관로의 건전도를 평가하고 개량계획을 수립하는데 이용하는 방법이다. 그리고 수도사업체가 대응적 진단을 바탕으로 개량의 우선순위를 결정하고 필요한 예산을 배분할 때는 점수평가법이나 편익-비용분석(cost-benefit analysis)을 많이 이용하고 있으며 이러한 경우 상수관로의 파손추세와 이에 따른 영향인자는 중요한 요소로 작용한다.

그러나 대응적 진단의 방법인 점수평가법은 융통성이 있고 비용적 측면에서 효과적이며 대부분 수도사업체에서 사용하기에 편리한 장점을 제공하지만, 이러한 평가법은 발생한 문제에 대해 논증적 범위의 자료를 갖고 있는 관로의 평가에만 적용된다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 점차적으로 노후 관로가 증가하는 대규모 수도사업체는 대응적 진단의 한계를 극복하고 노후화 과정의 동적인 상태를 예측할 수 있는 방법의 모색이 필요하다. 예측적 진단으로 개량계획은 점수평가법이나 편익-비용분석을 활용하여 보다 정확히 평가후보 관로를 선별하고 유지관리, 갱생, 교체의 예방적 유지관리가 필요한 관로의 우선순위를 결정한다. 즉, 각 관로에 대한 종합적인 정보와 예측도구를 바탕으로 관로의 현재 물리적 상태를 평가하여 체계적인 계량계획을 수립하는데 이용되는 방법이다. 한편, 관 개량 모형의 장·단점은 표 2에 나타내었다.

초기의 상수관로의 개량계획 모형인 Sullivan 등(1982)의 모형은 대응적 방법으로 관의 갱생 및 교체의 결정을 유지보수기록, 수도손실 실험, 매설된 관의 피복 상태, 누수 및 파손 기록 등을 이용하여 개량계획을 수립하였으나 이러한 모형들은 Operation Research(이하 OR) 기법을 사용하지 않고 단지 실제 현장자료와 몇 가지의 일반적인 지침에 기초를 둔 모형들이다. 이후 OR 기법을 사용한 Woodbrun 등(1987), Lansey 등(1992)의 모형은 너무도 이론적으로 치우친 나머지 수학적 모형화가 복잡하고 전산화가 어려우며 많은 계산시간을 요구함에 따라 실무적으로 적용에 많은 무리가 있다. 또한 이러한 모형들은 이미 지적한 여러 문제점 이외에도 모형의 구조에 필요한 많은 자료가 부족한 우리나라의 실정을 고려하지 못하여 국내의 상황에 적용시키기는 부적합하다. 그러므로 상수관로의 자료의 제약이 적고, 모형구조가 국내 현실에 적합한 모형이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 모형의 장·단점을 개선하여 최단 경로를 응용한 관 개량 모형은 현재 상태의 관의 노후도를 판정하고 이에 따른 각각의 관로의 개량 계획을 수립할 수 있으며, 예산제약에 따른 장기 개량 계획을 수립할 수 있는 최단경로를 응용한 모형을 제안하였다.

### 2.2.2 최단경로(shortest path) 모형

최단 경로 문제는 Network Flow 문제의 일종으로서 시작 노드에서 마지막 노드까지 최소 비용을 갖는 경로를 찾는 문제이며 아래와 같은 모형으로 구성된다. 이 모형은 주어진 두 마디간에 가장 적은 비용으로 많은 물류를 운반하는 모형으로 생산 및 분배, 설비위치 결정, 자원관리 등에 사용되어 응용 발전하였다. 기본적 목적함수 및 제약조건 식은 다음과 같다.

Objective function

$$\text{Min} \sum_{i:(i,j \in A)} C_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

표 2. 관 개량 모형의 장·단점 비교

구 분	장 점	단 점
기존 관 개량 모형 (Shamir형 모형)	<ul style="list-style-type: none"> <li>모형의 수식이 쉽다</li> <li>파손율 함수 및 비용함수 입력자료로 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>관의 현재 노후도 정도를 파악 할 수 없음</li> <li>관의 노후도 정도를 파손율 함수에 의존</li> <li>개량시기가 매설 후 일정 기간 후에 발생</li> <li>OR 기법이 아닌 경제성 분석</li> </ul>
최단경로를 응용한 관 개량 모형	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 관 개량 모형이 가능 수행</li> <li>현재 상태의 관의 노후도 파악</li> <li>잔존가치를 고려한 모형</li> <li>예산을 고려한 장기간의 개량계획 수립</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>모형의 수식이 어려움</li> <li>관의 최대 잔존수명을 가정</li> </ul>

Subject to

$$\sum_{j:(j,i \in A)} X_{ji} - \sum_{j:(j,i \in A)} X_{ij} = -1 \quad \text{for } i \in S \quad (5)$$

$$\sum_{j:(j,i \in A)} X_{ji} - \sum_{j:(j,i \in A)} X_{ij} = 0 \quad \text{for } i \notin S, T \quad (6)$$

$$\sum_{j:(j,i \in A)} X_{ji} - \sum_{j:(j,i \in A)} X_{ij} = 1 \quad \text{for } i \in T \quad (7)$$

$$X_{ji} \geq 0 \quad \text{for } (j, i \in A) \quad (8)$$

여기서,  $X_{ij}$ 는  $i$  노드에서  $j$  노드로 흐르는 흐름량 즉 그 경로를 통과를 의미하며,  $C_{ij}$ 는 이때의 비용이다. 그리고  $X_{ij}$ 는 갈 수 있는 경로의 집합( $A$ : arc set)에서만 가능하다. 또한,  $S$ 는 시작노드(start node)이며,  $T$ 는 마지막 노드(terminal node)를 뜻한다. 모형을 자세히 살펴보면, 식 (4)은 목적함수로 지나는 경로의 비용 또는 거리의 총 합을 최소화해야 함을 의미한다.

제약조건식은 자신의 노드로 들어온 양에서 다른 노드로 나간 양의 차가 1, 0, -1 중에서 하나가 된다. 이

때 식 (5)는 시작 노드의 경우 들어오는 양은 없고 다른 노드로 나가는 양만 1이 되므로 -1이 된다. 그리고 마지막 노드는 반대로 들어오는 양만 존재하므로 식 (7)은 1이 된다. 그 밖의 노드는 들어온 만큼 모두 나가게 되므로 식 (6)은 0이다. 또한, 식 (8)은 모든 흐름량  $X_{ij}$ 은 항상 "0" 보다 큰 값을 가진다. 이와 같은 최단경로(shortest path) 문제는 Network Flow 기법을 이용한 선형계획법(linear programming)으로 해를 구하는 방법과 동적계획법(dynamic programming, DP)을 이용하여 해를 구하는 방법이 알려져 있다. 그러나 문제의 많은 제약조건이 가지는 DP를 이용할 경우 Dimension에 의한 해를 산정하는 시간이 많이 소요되므로, 이를 정수계획법(integer programming)으로 대체함으로써 보다 빠른 시간 내에 해를 산정할 수 있다.

### 2.2.3 최단경로를 응용한 최적개량 모형

본 연구에서 제시한 개량모형은 네트워크 모형을 기반으로 몇 가지 제약식을 추가한 최단경로(shortest

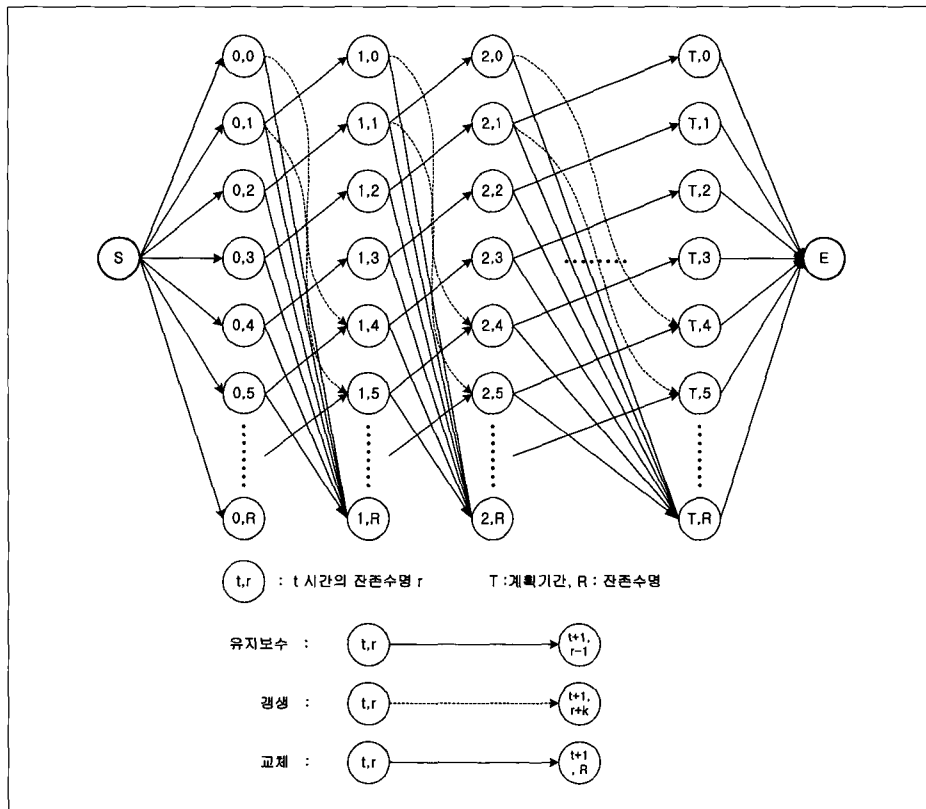


그림 2. 개량모형을 위한 네트워크 구조

path) 형태의 문제이다. 네트워크 모형의 구조는 다음 그림 2와 같다.

관망의 등급을 바탕으로 관경에 따라 산정한 잔존 수명을 기준으로 네트워크 모형을 구성하였으며, 관망을 유지보수 할 경우 잔존수명은 “1” 기간만큼 줄어들게 되며, 갱생을 하였을 경우 “k” 기간만큼 수명이 연장된다. 한편 관망은 수명기간동안 갱생을 한번 이상 수행할 수 없으므로 교체 전 갱생은 한번 이상은 할 수 없다는 제약식을 추가하였다.

이 문제는 제약식이 추가된 최단경로 문제로서, 이 문제를 풀기 위한 기법은 DP(dynamic programming) 기법과 IP(integer programming) 기법이 있다. 제약식이 추가되지 않은 일반적인 최단경로 문제는 DP 기법과 Network Flow 기법을 이용한 LP 문제로 쉽게 풀 수 있다. 하지만 이 문제는 제약식이 추가되어 네트워크 LP인 최단경로 문제가 IP문제가 되며, DP를 이용할 경우 Dimension이 추가되어 실제 프로그램의 실행 시간이 매우 오래 걸리게 되므로 IP로 모형을 구축하였다.

### 3. 모형의 구축

#### 3.1 모형의 전체구조

본 연구는 매설관로의 노후도 정도를 예측하여 이를

기준으로 관의 최적 개량을 수립하는 모형으로 모형은 크게 2가지로 나뉘어 설명할 수 있다. 즉, 매설된 관의 노후도 정도를 등급으로 나타낼 수 있는 모형과 최적의 개량 방법 및 시기를 결정할 수 있는 모형으로 크게 2가지로 구분할 수 있다.

노후도 예측모형은 관의 노후도에 영향을 미치는 인자 및 인자별 가중치를 이용하여 각각의 관로에 대한 노후도를 5가지 등급으로 산정한다. 또한, 산정된 관별 노후도 등급 및 관경에 따른 최대 잔존수명을 가정하여 이를 기준으로 최적의 개량계획을 수립할 수 있다. 그림 3은 본 연구에서 제시하는 전체모형의 구조를 나타내었다.

#### 3.2 노후도 예측 모형 구축

대부분의 확률론적 신경망 모형과 같이 본 노후도 예측모형도 입력층, 패턴층, 합산층, 그리고 출력층의 4개의 층으로 구성되었다. 이러한 학습패턴의 구조는 그림 4에 나타내었다.

입력층에는 표본관로의 상태에 따라 정의한 조건 값이 각각의 신경(neuron)에 들어가게 하였으며, 패턴층(pattern layer)에는 5개의 큰 신경(neuron)이 들어가게 하였으며 하나의 큰 신경은 담당 경계 조건 값을 담당하게 하였다. 첫 번째의 큰 신경은 1이라는 조건 값

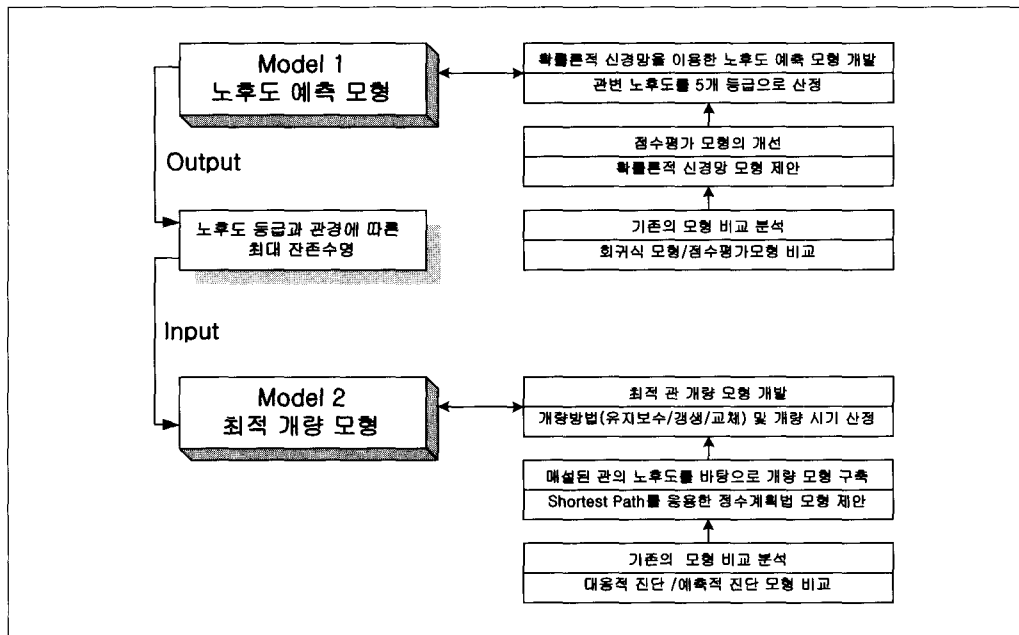


그림 3. 모형의 전체 구조



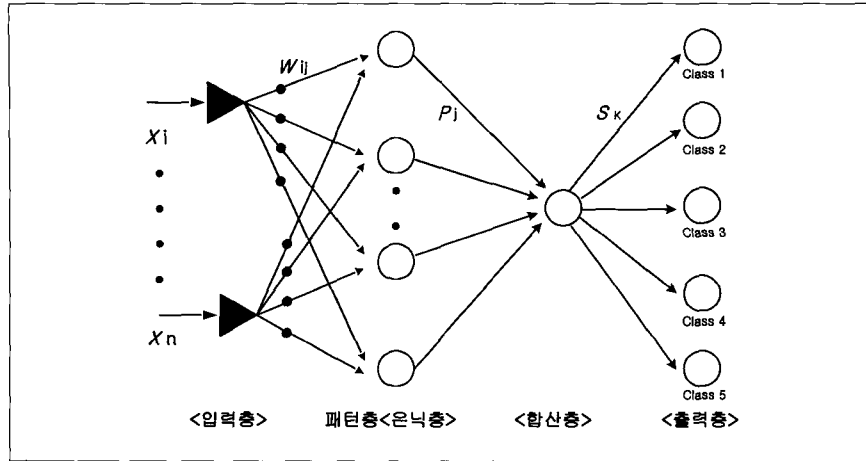


그림 4. 실제 모형의 확률론적 신경망 구축

으로 된 신경을 포함하게 되고 두 번째, 세 번째, 네 번째, 다섯 번째는 각각, 0.75와 0.5, 0.25, 0.0만으로 된 9개의 작은 학습신경들이 모여서 되는 것이다. 9개인 이유는 본 모형에서의 영향인자의 종류가 9개이기 때문이다.

패턴층에서는 입력자료와 학습신경과의 거리를 측정하여 이를 활동함수에 포함시켜서 입력자료의 특성을 파악하여 계급을 나누는 핵심적인 역할을 한다. 본 모형은 활동함수에서 자료의 폭과 넓이를 결정하는 함수로 가우시안 함수가 사용되었다. 또, 입력층과 패턴층 사이에는 무작위로 구할 수 있는 가중치 집단을 곱해주었다. 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 각각의 영향인자들이 노후화에 미치는 비중을 고려하기 위함이다.

합산층(summation layer)에는 1개의 합산신경이 들어가게 된다. 이 합산 신경은 패턴층으로 부터 나온 학습된 자료를 단순히 합하는 역할을 하게되는 것이다. 출력층(output layer)에는 단순 분류기능을 가진 5개의 신경이 있다. 출력층에서 계급을 구분함에 있어 계급을 어떠한 퍼센트로 나누는 것이 아니라 입력 데이터가 들어가 학습되어진 자료를 각각의 값을 합산층에서 구한 단순합만을 가지고 나누었다.

이것을 class1, class2, class3, class4, class5라 정의하였으며, class1은 조건 값 중에 1만을 담당하는 신경에 포함될 확률 값인 것이다. 이런 방식으로 구한 class1, class2, class3, class4, class5 중 가장 큰 값을 가지는 것을 택하며, 만약 class1이 가장 클 경우 그것에 1등급을 부여하였다. 이런 방법으로 1등급, 2등급, 3등급, 4등급, 5등급으로 구분하였다. 즉, 예를 들어

노후도 예측 결과에서 class1값이 0.25, class2값이 0.2, class3값이 0.35, class4값이 0.15, class5값이 0.05이면, 등급에 포함된 확률이 가장 높은 class3이 선택되며 최종으로 3등급으로 산정된다.

### 3.3 최적 개량 모형 구축

#### 3.3.1 예산제약을 제외한 모형

최적개량 모형은 크게 예산을 고려한 모형과 예산을 고려하지 않은 모형으로 나누어 구축하였다. 개량 모형을 구축하기 위해 먼저 예산 제약을 고려하지 않은 모형을 다음과 같은 목적함수식 및 제약조건식을 식(9)~(31)에 나타내었다.

Objective Function :

$$\text{Min } \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{r=1}^R C_m t_{t+1,r-1} X_{m t,t+1,r-1} + \sum_{t=0}^{T-1} C_f T F_t + \sum_{t=0}^{T-1} C_r T R_t + \sum_{t=0}^T C_a T A_t \quad (9)$$

Subject to :

$$\sum_{r=0}^R X_{s,r} = 1 \quad (10)$$

$$X_{s,r} - X_{f,t,t+1,r+k} - X_{r,t,t+1,r} = 0 \quad \text{for } r=0, \text{ for } t=0 \quad (11)$$

$$X_{s,r} - X_{m,t,t+1,r-1} - X_{f,t,t+1,r+k} - X_{r,t,t+1,r} = 0 \quad \text{for } 0 < r < k, \text{ for } t=0 \quad (12)$$

$$X_{s,r} - X_{m,t,t+1,r-1} - X_{f,t,t+1,r+k} - X_{r,t,t+1,r} = 0 \quad \text{for } k \leq r < R-k, \text{ for } t=0 \quad (13)$$

$$Xs_r - Xm_{t,t+1,r-1} - Xr_{t,t+1,r} = 0 \quad (14)$$

for  $R-k \leq r < R$ , for  $t = 0$

$$Xs_r - Xm_{t,t+1,r-1} = 0 \quad (15)$$

for  $r = R$ , for  $t = 0$

$$Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xf_{t,t+1,r+k} - Xr_{t,t+1,r} = 0 \quad (16)$$

for  $r = 0$ , for  $0 < t < T$

$$Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xm_{t,t+1,r-1} - Xf_{t,t+1,r+k} - Xr_{t,t+1,r} = 0 \quad (17)$$

for  $0 < r < k$ , for  $0 < t < T$

$$Xf_{t-1,r+1,t_r} + Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xm_{t,t+1,r-1} - Xf_{t,t+1,r+k} - Xr_{t,t+1,r} = 0 \quad (18)$$

for  $k \leq r < R-k$ , for  $0 < t < T$

$$Xf_{t-1,r+1,t_r} + Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xm_{t,t+1,r-1} - Xr_{t,t+1,r} = 0 \quad (19)$$

for  $R-k \leq r < R$ , for  $0 < t < T$

$$\sum_{r=0}^R Xr_{t-1,t_r} - Xm_{t,t+1,r-1} = 0 \quad (20)$$

for  $r = R$ , for  $0 < t < T$

$$Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xe_r = 0 \quad (21)$$

for  $r = 0$ , for  $t = T$

$$Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xe_r = 0 \quad (22)$$

for  $0 < r < k$ , for  $t = T$

$$Xf_{t-1,r+1,t_r} + Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xe_r = 0 \quad (23)$$

for  $k \leq r < R-k$ , for  $t = T$

$$Xf_{t-1,r+1,t_r} + Xm_{t-1,r+1,t_r} - Xe_r = 0 \quad (24)$$

for  $R-k \leq r < R$ , for  $t = T$

$$\sum_{r=0}^R Xr_{t-1,t_r} - Xe_r = 0 \quad (25)$$

for  $r = R$ , for  $t = T$

$$\sum_{r=0}^R Xe_r = 1 \quad (26)$$

$$TF_t = \sum_{r=0}^{R-k} Xf_{t,t+1,r+k} \quad (27)$$

for  $0 \leq t \leq T$

$$TR_t = \sum_{r=0}^{R-1} Xr_{t,t+1,r} \quad (28)$$

for  $0 \leq t \leq T$

$$RS_0 = 1 \quad (29)$$

$$RS_t = RS_{t-1} + TR_t - TA_t - TF_t \quad (30)$$

for  $0 < t \leq T$

$$\text{All Variable is } \{0, 1\} \quad (31)$$

여기서,

$Cm_{t,t+1,r-1}$ : 잔존수명이  $r$ 인 관의 유지보수비용

$Cf$  : 갱생비용

$Cr$  : 교체비용

$Ca$  : 인공변수비용

$Xm_{t,t+1,r+k}$ :  $t$ 시점에 잔존수명이  $r$ 인 관의 유지보수 경로

$Xf_{t,t+1,r-1}$ :  $t$ 시점에 잔존수명이  $r$ 인 관의 갱생 경로

$Xr_{t,t+1,r}$ :  $t$ 시점에 잔존수명이  $r$ 인 관망의 교체 경로

$Xs_r$ : 시작 시점에 잔존수명이  $r$ 인 관의 시작 아크

$Xe_r$ : 마지막 시점에 잔존수명이  $r$ 인 관의 마지막 아크

$TR_t$ :  $t$ 시점의 교체 여부

$TF_t$ :  $t$ 시점의 갱생 여부

$TA_t$ :  $RS_t$ 가 2가 되지 않도록 막아주는 인공변수

$RS_t$ :  $t$ 시점에 교체 후 갱생이 일어나는지 여부

상기 식 (9)~(31)에 대한 설명을 살펴보면, 식(9)는 목적함수로 전체 비용을 최소화하는 목적을 의미하며, 식 (10)~(31)까지는 제약조건식이 된다. 이 중에서 식 (10)~(26)까지는 Network Flow의 최단 경로 문제의 수학적식이 된다.

자세히 살펴보면, 식 (10)인 제약식조건식은 S노드(시작 노드)에서 흐르는 양의 합은 1이 된다는 식이다. 본 모형에서는 관찰된 관로의 잔존수명을 바탕으로 시작노드에서  $t=0$  시점의 흐름량을 정해 준다. 식 (11)~(15)은  $t=0$  시점에 시작 노드에서 들어온 흐름량과  $t=1$  시점으로 나간 흐름량이 같다는 Flow Conservation 제약식이다.  $t=0$  시점에 들어온 흐름량은 시작 노드에 서부터 시작되며 관찰된 관망의 잔존수명으로부터 결정 된다. 한편  $t=1$  시점으로 나갈 수 있는 흐름량은  $t=0$  시점의 잔존수명에 따라 유지관리, 갱생, 교체가 가능하다는 것을 의미한다.

즉, 식 (11)은  $t=0$  시점의 잔존 수명이 0인 경우 갱생 또는 교체만이 가능하다. 그러므로 시작 노드에서 들어온 양이 다음기간으로 갱생 또는 교체로 모두 나간다는 것을 의미한다. 그리고 식 (12)와 식 (13)은 잔존

수명이 1 이상이므로 식 (11)의 경우에서 다음기간으로 유지관리를 통해 나갈 수 있다는 것과 다르다.

또한 식 (14)는 관망을 갱신했을 때 잔존 수명이 관망의 수명보다 커지는 경우로서 이와 같은 경우에는 갱신은 일어나지 않는다고 가정한다. 그러므로 시작노드에서 들어온 흐름량은 유지관리 또는 교체로 나가게 된다. 그리고 식 (13)은 잔존수명이 관망의 수명과 같은 경우로 무조건 다음기간으로 유지관리만 한다. 한편, 식 (16)~(20)은 일반적인 노드의 이전 시점에서 들어온 흐름량과 다음 시점으로 나간 흐름량이 같다는 Flow Conservation 제약식이다.

이는 이전 시점에서 유지관리, 갱신, 교체 중 가능한 것을 통해 들어온 흐름량과 다음 시점으로 현재 노드의 잔존 수명에 따라 유지관리, 갱신, 교체 중 가능한 것을 통해 나간 흐름량의 합이 같다는 것을 의미한다. 즉, 식 (16)은 잔존 수명이 0인 경우 이전 노드에서 유지관리를 했을 때만 가능하고, 다음 노드로는 갱신 또는 교체가 가능하다. 그러므로 유지관리를 통해 들어와서 갱신 또는 교체로만 나갈 수 있다.

그리고 식 (17)은 잔존수명이 "1" 이상이고 갱신을 통해 늘어나는 수명 사이에 있는 경우로서 식 (16)과 같이 이전 노드에서는 유지관리를 했을 때만 가능하다. 그러나 다음 노드로 유지 관리를 통해 나갈 수 있음이 다르다. 한편 식 (18)은 잔존 수명이 갱신을 통해 늘어나는 수명보다 큰 경우로서 이전노드에서는 갱신을 통해서도 가능하다. 그러므로 갱신, 유지관리로 들어와서 갱신과 유지관리 교체로 나갈 수 있다.

또한 식 (19)은 관망을 갱신했을 때 잔존 수명이 관망의 수명보다 커지는 경우로서 식 (18)과는 달리 갱신은 일어나지 않는다고 가정하여 유지관리와 갱신으로 들어와서 교체와 유지관리로 나감을 알 수 있다. 그리고 식 (20)은 잔존수명이 장비 수명과 같은 경우로 이전 노드에서 교체를 통해 가능하고 다음노드로는 유지관리만 한다. 그러므로 이전 기간 전체 노드에서 교체로 들어온 모든 양은 유지관리로 나감을 의미한다. 그리고 식 (21)~(25)는  $t=T$  노드의 이전 시점에서 들어온 흐름량과 Terminal 노드인 E 노드로 나간 흐름량이 같다는 Flow Conservation 제약식이다. 즉 이전 시점에서 유지관리, 갱신, 교체 중 가능한 것을 통해 들어온 흐름량과 E 노드로 나간 흐름량의 합이 같다는 것을 의미한다.

식 (21)은 식 (16)과 같이 잔존수명이 0인 경우로 유지관리로 들어와서 Terminal 노드로 나감을 알 수

있다. 그리고 식 (22)은 이전 노드에서 갱신을 통해 들어올 수 없음을 의미하고 나갈 수 있는 노드는 Terminal 노드만 가능하므로 식 (21)과 같다.

한편 식 (23)은 식 (18)과 같이 갱신으로 들어올 수 있으므로 갱신과 유지관리로 들어와서 Terminal 노드로 나감을 의미하며 식 (24)도 식 (23)과 같다.

또한 식 (25)은 이전 기간에서 교체로 들어와 잔존 수명이 관망 수명과 같아진 경우로 교체로 들어와 Terminal 노드로 나감을 의미한다. 그리고 식 (26)은 Terminal 노드인 E 노드로 들어온 흐름량의 합은 1이 됨을 의미한다. 즉 S 노드에서 출발한 흐름량이 Terminal 노드인 E로 들어옴을 의미한다. 여기에 식 (27)~(31)은 갱신은 교체 전 한번밖에 할 수 없다는 제약식을 의미한다. 먼저 식 (27)은  $t$  기간에 갱신한 관망의 수로서  $t$  기간에 갱신을 하였는지 하지 않았는지를 알 수 있다. 식 (28)은  $t$  기간에 교체한 관망의 수로서  $t$  기간에 교체를 하였는지 혹은 하지 않았는지를 알 수 있다. 그리고 식 (30)은 상태변수 RS를 설정하는 것으로서 교체를 한 이후에 갱신을 하지 않으면 RS 변수는 1이 되도록 한다. 그리고 갱신을 하면 RS는 0이 된다. RS는 0 또는 1만을 가질 수 있으므로 갱신과 갱신 사이에 교체가 이루어져야만 함을 알 수 있다. 한편 TA 변수는 인공변수로서 RS가 2가 되는 것을 막아준다. 즉 교체가 갱신 없이 계속 일어나면 RS는 2가 되는데 이때 TA를 1을 만들어 주어 RS가 1이 되도록 한다. 식 (29)은 RS 변수의 시작 값을 1로 정함으로써 시작 기간으로부터 교체가 일어나지 않은 상태에서 갱신이 일어날 수 있음을 의미한다. 마지막 식 (31)은 모든 변수가 0 또는 1값을 가져야 함을 의미한다. 즉 1을 갖는 변수는 아크로 흐름을 의미하며, 갱신, 교체, 유지관리가 어느 시점에 이루어 졌는지 알 수 있다.

### 3.3.2 예산제약을 고려한 모형

앞의 3.2.1절에 설명한 모형은 개별 관망의 최적 갱신 및 교체 시점을 결정하기 위한 모형이다. 하지만 3.2.1절의 모형은 개별 관망의 최적 갱신 및 교체 시점만을 분석하였기 때문에 같은 해에 갱신 및 교체가 집중될 수 있는 한계가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 전체 관망에 대하여 한 해에 지출 할 수 있는 비용을 제약 조건으로 추가하였다. 비용의 산정은 3.3.1절 모형 적용결과에서 산정한 매년의 비용을 분석하여 그 중 최고 비용의 80%값을 산정하여 이를 비용 제약조건으로 하여 분석하였다. 전체 모형은 3.3.1절의 개별 관

망의 최적화 모형에 식 (55)이 추가되었다. 구체적인 목적함수와 제약식은 다음과 같다.

Objective Function :

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{p=1}^P \left\{ \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{r=1}^R Cm_{t,t+1,r}^p X m_{t,t+1,r}^p \right. \\ & + \sum_{t=0}^{T-1} Cf^p TF_t^p + \sum_{t=0}^{T-1} Cr^p TR_t^p - \\ & \left. \sum_{r=0}^R Ce_r^p Xe_r^p + \sum_{t=0}^T Ca^p TA_t^p \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

subject to :

$$\sum_{r=0}^R Xs_r^p = 1 \quad \text{for } 0 \leq p \leq P \quad (33)$$

$$Xs_r^p - Xf_{t,t+1,r+k}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } r=0, \text{ for } t=0, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (34)$$

$$Xs_r^p - X m_{t,t+1,r-1}^p - Xf_{t,t+1,r+k}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } 0 < r < k, \text{ for } t=0, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (35)$$

$$Xs_r^p - X m_{t,t+1,r-1}^p - Xf_{t,t+1,r+k}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } k \leq r < R-k, \text{ for } t=0, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (36)$$

$$Xs_r^p - X m_{t,t+1,r-1}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } R-k \leq r < R, \text{ for } t=0, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (37)$$

$$Xs_r^p - X m_{t,t+1,r-1}^p = 0 \quad \text{for } r=R, \text{ for } t=0, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (38)$$

$$X m_{t-1,r+1,t}^p - Xf_{t,t+1,r+k}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } r=0, \text{ for } 0 < t < T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (39)$$

$$X m_{t-1,r+1,t}^p - X m_{t,t+1,r-1}^p - Xf_{t,t+1,r+k}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } 0 < r < k, \text{ for } 0 < t < T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (40)$$

$$Xf_{t-1,r-k,t}^p + X m_{t-1,r+1,t}^p - X m_{t,t+1,r-1}^p - Xf_{t,t+1,r+k}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } k \leq r < R-k, \text{ for } 0 < t < T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (41)$$

$$Xf_{t-1,r-k,t}^p + X m_{t-1,r+1,t}^p - X m_{t,t+1,r-1}^p - Xr_{t,t+1,r}^p = 0 \quad \text{for } R-k \leq r < R, \text{ for } 0 < t < T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (42)$$

$$\sum_{r=0}^R Xr_{t-1,t,r}^p - X m_{t,t+1,r-1}^p = 0 \quad \text{for } r=R, \text{ for } 0 < t < T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (43)$$

$$X m_{t-1,r+1,t}^p - X e_r^p = 0 \quad \text{for } r=0, \text{ for } t=T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (44)$$

$$X m_{t-1,r+1,t}^p - X e_r^p = 0 \quad \text{for } 0 < r < k, \text{ for } t=T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (45)$$

$$Xf_{t-1,r-k,t}^p + X m_{t-1,r+1,t}^p - X e_r^p = 0 \quad \text{for } k \leq r < R-k, \text{ for } t=T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (46)$$

$$Xf_{t-1,r-k,t}^p + X m_{t-1,r+1,t}^p - X e_r^p = 0 \quad \text{for } R-k \leq r < R, \text{ for } t=T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (47)$$

$$\sum_{r=0}^R Xr_{t-1,t,r}^p - X e_r^p = 0 \quad \text{for } r=R, \text{ for } t=T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (48)$$

$$\sum_{r=0}^R X e_r^p = 1 \quad \text{for } 0 \leq p \leq P \quad (49)$$

$$TF_t^p = \sum_{r=0}^{R-k} Xf_{t,t+1,r+k}^p \quad \text{for } 0 \leq t \leq T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (50)$$

$$TR_t^p = \sum_{r=0}^{R-1} Xr_{t,t+1,r}^p \quad \text{for } 0 \leq t \leq T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (51)$$

$$RS_0^p = 1, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (52)$$

$$RS_t^p = RS_{t-1}^p + TR_t^p - TA_t^p - TF_t^p \quad \text{for } 0 < t \leq T, \text{ for } 0 \leq p \leq P \quad (53)$$

$$\sum_{p=0}^P \left\{ \sum_{r=1}^R Cm_{t,t+1,r}^p X m_{t,t+1,r}^p + Cf^p TF_t^p + Cr^p TR_t^p \right\} \leq B_t \quad \text{for } 0 \leq t < T, \text{ for } 0 \leq p \leq P$$

$$\text{All Variable is } \{0, 1\} \quad (55)$$

여기서,

$Cm_{t,t+1,r}^p$ : p관로의 잔존수명이 r인 관의 유지보수비용

$Cf^p$ : p관로의 갱생비용

$Cr^p$ : p관로의 교체비용

$Ce_r^p$ : p관로의 마지막 시점에 잔존 수명이 r만큼 남았을 때의 잔존가치, P는 총관의 개수이다.

$Ca^p$ : p관로의 인공변수비용,

$X m_{t,t+1,r+k}^p$ : t시점에 잔존수명이 r인 p관로의 유지관리 경로

- $Xf_{t,t+1,r-1}^p$  : t시점에 잔존수명이 r인 p관로의 갱생 경로
- $Xr_{t,t+1,r}^p$  : t시점에 잔존수명이 r인 p관로의 교체 경로
- $Xs_r$  : 시작 시점에 잔존수명이 r인 p관로의 시작 아크
- $Xe_r^p$  : 마지막 시점 잔존수명이 r인 p관로의 마지막 아크
- $TR_t^p$  : t시점의 p관로의 교체 여부
- $TF_t^p$  : t시점의 p관로의 갱생 여부
- $TA_t^p$  : p관로의  $RS_t$ 가 2가 되지 않도록 막아 주는 인공변수
- $RS_t^p$  : t시점에 교체 후 갱생이 일어나는지 여부

여기서 잔존 가치는 교체비용을 관로 수명기간 동안 정액법 감가상각법으로 감가상각 되도록 하여 계산하였다. 모형의 자세한 설명은 다음과 같다.

식 (32)은 목적함수로 전체 비용을 최소화하는 목적을 의미하며, 식 (33)~(55)까지는 제약조건식이 된다. 이 중에서 식 (33)~(49)까지는 Network Flow의 최단 경로 문제의 수학식이 된다. 자세히 살펴보면, 식 (33) 제약조건식은 S노드(시작 노드)에서 흐르는 양의 합은 1이 된다는 식이다. 본 모형에서는 관찰된 관망의 잔존수명을 바탕으로 시작노드에서 t=0 시점의 흐름량을 정해 준다.

식 (34)~(38)은 t=0 시점에 시작 노드에서 들어온 흐름량과 t=1 시점으로 나간 흐름량이 같다는 Flow Conservation 제약식이다. t=0 시점에 들어온 흐름량은 시작 노드에서부터 시작되며 관찰된 관망의 잔존수명으로부터 결정된다. 한편 t=1 시점으로 나갈 수 있는 흐름량은 t=0 시점의 잔존수명에 따라 유지관리, 갱생, 교체가 가능하다.

즉, 식 (34)은 t=0 시점의 잔존 수명이 0인 경우 갱생 또는 교체만이 가능하다. 그러므로 시작 노드에서 들어온 양이 다음기간으로 갱생 또는 교체로 모두 나간다는 것을 의미한다. 그리고 식 (35)와 식 (36)은 잔존 수명이 1 이상이므로 식 (34)의 경우에서 다음기간으로 유지관리를 통해 나갈 수 있다는 것이 다르다.

또한 식 (37)은 관망을 갱생했을 때 잔존 수명이 관

망의 수명보다 커지는 경우로서 이와 같은 경우에는 갱생은 일어나지 않는다고 가정한다. 그러므로 시작노드에서 들어온 흐름량은 유지관리 또는 교체로 나가게 된다. 그리고 식 (38)은 잔존수명이 관망의 수명과 같은 경우로 무조건 다음기간으로 유지관리만 한다. 한편, 식 (39)~(43)은 일반적인 노드의 이전 시점에서 들어온 흐름량과 다음 시점으로 나간 흐름량이 같다는 Flow Conservation 제약식이다.

즉 이전 시점에서 유지관리, 갱생, 교체 중 가능한 것을 통해 들어온 흐름량과 다음 시점으로 현재 노드의 잔존 수명에 따라 유지관리, 갱생, 교체 중 가능한 것을 통해 나간 흐름량의 합이 같다는 것을 의미한다. 즉, 식 (39)은 잔존 수명이 0인 경우 이전 노드에서 유지관리를 했을 때만 가능하고, 다음 노드로는 갱생 또는 교체만이 가능하다. 그러므로 유지관리를 통해 들어와서 갱생 또는 교체로만 나갈 수 있다. 그리고 식 (40)은 잔존수명이 1 이상이고 갱생을 통해 늘어나는 수명 사이에 있는 경우로서 식 (39)와 같이 이전 노드에서는 유지관리를 했을 때만 가능하다. 그러나 다음 노드로 유지 관리를 통해 나갈 수 있음이 다르다.

한편 식 (41)은 잔존 수명이 갱생을 통해 늘어나는 수명보다 큰 경우로서 이전노드에서는 갱생을 통해서도 가능하다. 그러므로 갱생, 유지관리로 들어와서 갱생과 유지관리 교체로 나갈 수 있다. 또한 식 (42)은 관망을 갱생했을 때 잔존 수명이 관망의 수명보다 커지는 경우로서 식 (41)과는 달리 갱생은 일어나지 않는다고 가정하여 유지관리와 갱생으로 들어와서 교체와 유지관리로 나감을 알 수 있다. 그리고 식 (43)은 잔존수명이 장비 수명과 같은 경우로 이전 노드에서 교체를 통해 가능하고 다음노드로는 유지관리만 한다. 그러므로 이전 기간 전체 노드에서 교체로 들어온 모든 양은 유지관리로 나감을 의미한다.

그리고 식 (44)~(48)은 t=T 노드의 이전 시점에서 들어온 흐름량과 Terminal 노드인 E 노드로 나간 흐름량이 같다는 Flow Conservation 제약식이다. 즉 이전 시점에서 유지관리, 갱생, 교체 중 가능한 것을 통해 들어온 흐름량과 E 노드로 나간 흐름량의 합이 같다는 것을 의미한다.

식 (44)은 식 (39)와 같이 잔존수명이 0인 경우로 유지관리로 들어와서 Terminal 노드로 나감을 알 수 있다. 그리고 식 (45)은 이전 노드에서 갱생을 통해 들어올 수 없음을 의미하고 나갈 수 있는 노드는 Terminal 노드만 가능하므로 식 (44)와 같다. 한편 식

(46)은 식 (41)과 같이 갱생으로 들어올 수 있으므로 갱생과 유지관리로 들어와서 Terminal 노드로 나감을 의미한다. 식 (47)도 식 (46)과 같다.

한편 식 (48)은 이전 기간에서 교체로 들어와 잔존 수명이 관망 수명과 같아진 경우로 교체로 들어와 Terminal 노드로 나감을 의미한다. 그리고 식 (49)는 Terminal 노드인 E 노드로 들어온 흐름량의 합은 1이 됨을 의미한다. 즉 S 노드에서 출발한 흐름량이 Terminal 노드인 E로 들어옴을 의미한다. 여기에 식 (50)~식 (54)는 갱생은 교체 전 한번밖에 할 수 없다는 제약식을 의미한다. 먼저 식 (50)은 t 기간에 갱생한 관망의 수로서 t 기간에 갱생을 하였는지 하지 않았는지를 알 수 있다. 그리고 식 (51)은 t 기간에 교체한 관망의 수로서 t 기간에 교체를 하였는지 하지 않았는지를 알 수 있다. 그리고 식 (53)은 상태변수 RS를 설정하는 것으로서 교체를 한 이후에 갱생을 하지 않으면 RS 변수는 1이 되도록 한다. 그리고 갱생을 하면 RS는 0이 된다. RS는 0 또는 1 만을 가질 수 있으므로 갱생과 갱생 사이에 교체가 이루어져야만 함을 알 수 있다.

한편 TA 변수는 인공변수로서 RS가 2가 되는 것을 막아준다. 즉 교체가 갱생 없이 계속 일어나면 RS는 2가 되는데 이때 TA를 1을 만들어 주어 RS가 1이 되도록 한다. 식 (52)은 RS 변수의 시작 값을 1로 정함으로서 시작 기간으로부터 교체가 일어나지 않은 상태에서 갱생이 일어날 수 있음을 의미한다. 그리고 식 (54)은 예산 제약식으로서 관로 1번부터 P번까지 t 시점에 유지보수, 갱생, 교체로 지출하는 총 비용이  $B_t$ 보다 작아야 한다는 제약식이다.

마지막 식 (55)은 모든 변수가 0,1 값을 가져야 함을 의미한다. 즉 1을 갖는 변수는 아크로 흐름을 의미하며, 갱생, 교체, 유지관리가 어느 시점에 이루어졌는지 알 수 있다.

#### 4. 결 론

기존의 수도관 개량사업은 매설관 관의 매설년도, 누수 및 파손기록 등을 바탕으로 수도사업소에서 정성적으로 시행되고 있다. 따라서 본 연구는 지방자치단체에서 시행하고 있는 수도관 개량 사업을 보다 정량적인 방법을 도입하여 경제적이고 효율적으로 개량사업을 수행하기 위해 상수관로의 노후도 예측에 근거한 최적 개량 모형을 개발하였다.

노후도 예측 모형은 노후도 등급에 따른 갱생 및 교

체 기준을 세우지는 않으나 각각의 등급에 속할 수 있는 확률의 크기를 근거로 표본관로의 등급을 분류하는 방식이며, 확률론적 신경망이라는 새로운 분류 알고리즘을 도입하였다. 본 연구에서 제안한 확률론적 신경망 모형은 기존의 점수평가 모형이 관의 교체를 판단하는 기준으로 일정한 점수를 부여하는 임의적인 분류였다면 본 연구의 모형은 매설된 관의 노후도 정도를 5등급으로 나뉘어 확률의 크기로 분류하는 모형이라 할 수 있다. 또한 인자항목별 점수배분과 총점에 대한 인자 그룹별 기여도를 수정 및 보완하는데 있어 유연성도 가지고 있다.

또한, 이러한 매설된 관의 노후도 정도를 파악하여 이를 기준으로 등급 및 관경에 따른 관의 최대 잔존수명을 이용하여 최적의 개량 계획을 수립할 수 있는 모형을 제안하였다.

기존의 관의 최적 개량 모형은 매설된 관의 노후도 정도를 단지 매설년수, 관의 통수능(C값) 등을 이용하여 개량계획을 수립하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 모형은 노후도 예측에 근거한 모형의 결과를 바탕으로 최적의 개량 계획을 수립할 수 있다. 즉, 최적 개량 모형은 기존에 매설된 관의 현재 상태를 반영하는 인자인 파손율합수만을 이용하여 개량시기를 결정하는 모형의 단점을 보완하기 위해 본 연구에선 노후도 예측 모형의 결과를 이용하여 최단경로를 응용한 정수계획법(integer programming)모형을 개발하였다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)"으로 지원 받은 과제입니다.

#### 참 고 문 헌

- 김응석, 김중훈, 이현동, 정원식, 박필재 (2002). "상수관로의 노후도 평가 : (I) 조사 방법 개발", **한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)**, 한국수자원학회, pp. 371-376.
- 김응석, 김중훈, 이현동, 정원식, 박필재 (2002). "상수관로의 노후도 평가 : (II) 영향 인자 및 가중치 산정", **한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)**, 한국수자원학회, pp. 419-424.
- 김중훈, 김중우, 이현동, 김성환 (1996). "기존 상수도 노후관망의 개량 및 관리기법의 개발", **한국수자원학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제3호, pp.

- 197-205.
- 이창용, 김응석, 신현석, 김중훈(2000). “확률적 신경망을 이용한 상수도 노후관 추정에 관한 연구”, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권 제 2-B호, pp. 197-210.
- 이현동 (1994). “수도관의 노후화 판정기법”, <건설 기술정보>, **한국건설기술연구원** 통권 125호, pp. 9-15.
- 전왕규 (1998). GIS를 이용한 상수도관의 노후도 평가 및 관리 시스템 개발, 석사학위논문, 인천대학교 대학원.
- 환경부 (2001). **유수율 제고 연구**.
- 한국수자원공사 (1995). **수도관 개량을 위한 의사결정 시스템 개발**.
- Andreou, S. A., D. H. Marks and R. M. Clark. (1987). “A new methodology for modeling failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory, *Adv. Water Resource*. Vol. 10, pp. 2-10.
- Clark, R. M., Stafford, C. L. and Goodrich, J. A. (1982). “Water distribution systems: A spatial and cost evaluation”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 108, pp. 243-257.
- Duan, Li, Yacov Y. H. (1992). “Optimal Maintenance-Related Decision Making for Deteriorating Water Distribution Systems” *J. W.R.R.* Vol. 28, No. 4, pp. 1053-1061.
- Halhal, D., Walters, G. A., Ouazar, D., and Savic, D. A. (1997). “Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 3, pp. 137-146.
- Kettler, A. J., and Goulter, L. C. (1985). “An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks”, *Can. Journal Civil Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 286-293.
- Kim, J. H. (1992). *Optimal Rehabilitation Replacement Model for Water Distribution System*. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Texas.
- Kim, J. H. and Mays, L. W. (1994). “Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution System”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 5, pp. 674-692, ASCE, September.
- Lansey, K. E., Basnet C., Mays, L. W., and Woodburn, J. (1992). “Optimal Maintenance Scheduling for Water Distribution Systems”, to published in *Civil Engineering System*, England.
- Walski, T. M. (1982). “Economic Analysis of Rehabilitation of Water Mains”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 108, No. 3, pp. 296-304.
- Walski, T. M. (1985). “Assuring Accurate Model Calibration,” *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 77, No. 12 pp. 38-41, December.
- 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 System-Boston’s Approach”, *Journal of the American Water Works Association*, Vol.74, No.11, pp. 555-559, November.
- Woodburn, J., Lansey, K. E., and Mays, L. W. (1987). “Model for the Optimal Replacement and Replacement of Water Distribution System Component”, *Proceeding of the 1987 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, pp. 606-611.

(논문번호:02-76/접수:2002.09.16/심사완료:2002.12.18)