

## Utopian Approach를 이용한 상수관망 개별관로 개량우선순위 산정에 관한 연구

### Study of Rehabilitation Priority Order of Pipes for Water Distribution Systems using Utopian Approach

유도근<sup>1</sup> · 전환돈<sup>2</sup> · 김중훈<sup>1\*</sup>

Yoo, Do Guen<sup>1</sup> · Jun, Hwan Don<sup>2</sup> · Kim, Joong Hoon<sup>1\*</sup>

1 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부, 2 서울산업대 건설공학부

(2009년 10월 13일 접수 ; 2010년 2월 26일 1차수정 ; 2010년 3월 31일 2차수정, 2010년 4월 5일 채택)

#### Abstract

Well planned rehabilitation order of pipes is essential for efficient maintenance and management of Water Distribution Systems. In this study, not only deterioration rate of pipes but also structural and nonstructural failure which causes abnormal condition of WDS is considered to determine rehabilitation order. Probabilistic Neural Network is used for calculating deterioration rate at present and the importance of pipes is computed under structural and nonstructural failure by using Pipe by Pipe Failure Analysis and Effect Index. Utopian Approach, one of the Multi-Criteria Decision Making methods, is used for assessment of final rehabilitation order based on distance measure between utopian point and alternative one. Developed model in this study shows that it gives more reliable results than existing methods considering hydraulic relative importance does in application to real networks. In this point, the newly developed model, which gives advantages over existing models, can make a credible decision and simple application.

**Key words** : Water Distribution System, Rehabilitation Order, Deterioration, Hydraulic Relative Importance, Utopian Approach

**주제어** : 상수관망, 개량우선순위, 노후도, 수리학적 상대적 중요성, Utopian Approach

#### 1. 서론

상수관망은 상수도 공급 사업을 위한 사회기반시설물 중의 하나로서 정수를 수송, 분배, 공급하는 기능을 가지며 상수관, 펌프, 탱크 및 밸브 등이 조합된 매우 복잡한 네트워크 시스템이다. 상수도사업 초기에는 수용가에게 충분한 양의 물을 공급하기 위하여 상수도 시설의 신설과 확장에 초점을 맞추었다. 하지만 국내에서 수도물을 처음 생산·공급한 후 100년이 지난 지금, 상수도사업은 초기의 신설과 확장에서

부터 지금의 개량과 갱신으로 사업의 중심이 옮겨져 가고 있다. 따라서 상수도시설기준 (2004)에서는 “장래에 걸쳐 급수의 안정성과 안전성을 유지하기 위해서는 계획적으로 끊임없이 시설을 개량하고 갱신해 나가는 것이 중요하다”고 명시되어 있다. 즉, 상수관망 유지관리의 최종적인 목표는 가능한 많은 수의 사용자를 만족시킬 수 있는 양질의 충분한 물을 안정적으로 공급하는 것이며, 이를 위해서는 평소 적절한 유지관리를 통하여 상수관의 성능이 최적으로 유지되도록 운영하여야 한다. 이와 같이 유지관리의 중요성이

\* Corresponding author Tel:+82-2-928-1426, Fax:+82-2-928-1426, E-mail: jaykim@korea.ac.kr(Kim, J.H.)

커짐에 따라 현재 노후 상수도관의 개량사업이 각 지자체 별로 시행되고 있다. 그러나 현재 우리나라의 노후관 개량사업은 경험적 판단에 의존하는 노후관 평가와 사고예방을 위한 대응적 차원의 개량 사업을 실시함으로써 경제적 손실은 물론 시스템의 기능향상이 이루어지지 않고 있다. 특히 노후관 평가 기준이 명확히 제시되지 않은 상태의 현재 상수관 개량사업은 상수관로의 매설년도만을 기준으로 개량 우선순위를 산정하고 있는 실정이다. 결국 상수관의 매설년도에 의한 노후도만이 절대적 중요도 개념으로 활용되면서 신뢰성 있는 개량우선순위 산정이 어려운 것이다.

상수관망 개량 우선순위 산정에 관한 초기 연구가 경험적 판단에 따른 개량 모형으로 시작된 이후 상수관망 개량 우선순위 산정에 관한 연구는 활발히 이루어져 왔다. 지금까지 연구된 상수관망 개량 우선순위 산정에 관한 연구는 크게 노후도 및 파괴가능성 분석, 회귀분석 및 파괴 확률 분석, 그리고 경제성 분석에 의한 개량 우선순위 산정으로 구분할 수 있다.

노후도 및 파괴가능성 분석에 대한 연구는 미국수도협회 연구기금(AWWARF, 1986), 영국의 Water Research Centre (1989), 한국수자원공사 (1995), 김 (2002), 김 (2003)에 의하여 연구되어 왔으며, 현재 상수관로의 물리적 노후도를 진단하여 개량우선순위 산정에 활용하는 방법이다. 노후도 및 파괴가능성 분석의 대표적인 모형은 UtilNets (1997)이 있으며, 이와 같은 노후도 및 파괴가능성에 의한 상수관망 개량 우선순위 산정에 대한 기존 연구들은 타 방법에 비하여 비교적 적용이 간단하다는 장점이 있지만 교체 및 갱생 여부를 결정하는 기준이 불분명하며, 상수관로의 노후도를 예측할 수 없다는 단점을 지닌다.

회귀분석 및 파괴 확률 분석에 대한 연구는 Marks et al. (1987), Newland (2000), Park et al. (2002a, 2002b)에 의하여 연구되었으며, 대표적인 모형은 Deb et al. (1998)의 KANEW과 Burn et al. (2003)의 PARMS, 그리고 Malandain et al. (1998)의 AssetMap가 있다. 이 모형들은 파괴 확률 분석을 통하여 관의 파괴에 대한 예측을 할 수 있다는 장점을 가지지만 결과를 얻기 위하여 방대한 기본데이터가 요구되며 복잡한 수식을 통하여 산정된다는 단점을 지닌다.

경제성 분석에 의한 상수관망 개량 우선순위 산정 모형은 Shamir and Howard (1979), Walski (1982), Luong et al. (2002), 백 (2002), 박 (2007) 등이 연구하였으며, 최소의 비용으로 최대의 효율을 낸다는 장점을 가진다. 하지만 이 모형 역시 방대한 기본데이터가 필요하며 상수관망이 국민의 복지에 직접적인 영향을 미치는 사회기반시설물임을 고려해보면 비용의 최적화는 필수조건이 되지 못한다.

거미줄 형상을 가지는 상수관로는 물리적 노후도뿐만 아니라, 매설위치, 밸브위치, 절점의 기본 용수수요량 및 수요량의 변동, 관내 흐르는 유량, 사용인구 수 등에 따라 상대적으로 중요한 관과 중요하지 않은 관으로 구분되어질 수 있다. 따라서 본 연구는 기존의 노후도에 의한 개량우선 순위 연구에 수리학적인 상대적 중요도를 고려하여 보다 더 신뢰성 있는 개량우선순위를 결정하는 기법을 제안하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 상수관의 노후도 뿐 만 아니라, 상수관망의 비정상상태를 야기할 수 있는 구조적 및 비구조적 파괴를 고려하여 상수관망 개별 관로의 개량 우선순위를 산정하였다. 확률론적 신경망 모형을 사용하여 상수관의 현재 노후도를 결정하였으며, Pipe by Pipe Failure Analysis와 영향지수 (Effect Index)를 사용하여 구조적 및 비구조적 파괴에 의한 상수관의 중요도를 계산하였다. 구조적 파괴는 상수관망의 구성요소인 상수관, 밸브의 물리적인 파괴를 의미하며 본 연구에서는 개별 상수관의 파괴를 모의하였다. 비구조적인 파괴는 물리적인 파괴가 아닌 상수관망의 비정상상태를 야기할 수 있는, 절점 수요량 및 상수관 압력의 급격한 변화 등을 의미하며, 본 연구에서는 절점 수요량의 변화에 의한 상수관 전체의 압력변화를 비구조적파괴로 정의하였다. 최종적인 관로별 개량 우선순위 산정을 위하여 이상점과 대안 사이의 거리를 기준으로 우선순위를 결정하는 Utopian Approach를 사용하였으며, 이 방법론을 수도정비사업을 계획한 J시 KA배수분구에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

## 2. 모형의 구성

### 2.1 확률론적 신경망 모형을 이용한 노후도 산정

확률론적 신경망 이론은 Specht (1990)에 의해 처음으로 제안되었다. 확률론적 신경망(Probabilistic Neural Network)은 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 결정하는 것을 의미한다. Specht는 어떠한 입력자료의 패턴도 계급으로 분류할 수 있는 네 개의 층으로 구성된 신경망을 제안하였다.

본 연구에서는 노후도 산정을 위하여 김 등 (2002), 김 등 (2002)이 제시한 인자들을 고려하였다. 그 중 적용대상 구역인 J시 KA배수분구의 경우에는 활용 가능한 총 12가지 인자를 고려하였다. 12가지 인자를 관체정보요인과 매설환경/외부요인으로 구분하였으며, 관체정보요인으로는 관중, 관경, 내부부식, 매설년도(사용년수), 접속방식, 누수 또는 밸브교체기록, 수질수압 등 민원기록, 그리고 최대수압의

총 8가지로 구분하였으며, 매설환경/외부요인으로는 외부부식, 토양종류, 주변도로, 그리고 매설지역의 총 4가지를 고려하였다. 확률론적 신경망 모형을 본 연구에 적용하기 위하여 인자들의 상태를 일정한 개수로 나눠야한다. 예를 들어, 매설환경/외부요인에 의한 상수관의 파괴 가능성을 구하기 위하여 사용된 외부부식, 토양종류, 주변도로, 매설지역의 인자들의 상태를 노후도의 영향이 가장 큰 값을 1.0으로 하며, 가장 적은 영향을 미치는 값을 0.0으로 하여 총 5개의 조건 값으로 각각 분류한다. 그리고 각 인자들의 상대적 가중치를 고유벡터방법 등을 사용하여 계산한다. 본 연구의 확률론적 신경망 모형은 Fig. 1과 같이 입력층, 패턴층, 합산층, 출력층으로 구성되어 있다. 입력층에는 표본관로의 상태에 따라 정의한 조건 값이 각각의 신경에 들어가게 되며, 패턴층에는 5개의 큰 신경이 들어가며, 하나의 큰 신경은 담당경계조건 값을 담당한다.

즉, 첫 번째의 큰 신경은 1이라는 조건 값으로 된 신경을 포함하게 되고 두 번째, 세 번째, 네 번째, 다섯 번째는 각각 0.75, 0.5, 0.25, 0.0으로만 된 4개의 작은 학습신경들이 모여게 된다. 여기서 의미하는 4개의 작은 학습신경은 외부부식, 토양종류, 주변도로, 매설지역을 의미한다.

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. 합산층에는 1개의 합산신경이 들어가게 된다. 이 합산신경은 패턴층으로부터 나온 학습된 자료를 단순히 합하는 역할을 하게된다. 출력층에는 단순 분류기능을 가진 5개의 신경이 있다. 출력층에서 계급을 구분함에 있어 계급을 어떠한 퍼센트로 나눈 것이 아니라 입력 데이터가 들어가 학습되어진 자료를 각각의 값을 합산층에서 구한 단순합만을 가지고 나눈다. 이 값들을 P1, P2, P3, P4, P5라 정의한다면, P1은 조건 값 중에 1만을 담당하는 신경에 포함될

확률 값을 의미한다. 이런 방식으로 구해진 P1, P2, P3, P4, P5 중 가장 큰 값을 가지는 것을 택하며, 만약 P1이 가장 클 경우 해당관로의 경우 노후도 등급이 1등급이 된다. 즉, 예를 들어 노후도 결과에서 P1, P2, P3, P4, P5의 값이 0.25, 0.2, 0.35, 0.15, 0.05라면 확률이 가장 높은 P3가 선택되며 해당관로의 노후도 최종등급은 3등급 (Group 3) 이 된다. 관체정보요인과 매설환경/외부요인에 의한 상수관의 노후도를 확률론적 신경망(PNN) 알고리즘을 적용하여 각 관별 등급과 확률 값을 획득한다. 그리고 관로별 값을 비교하기 위하여 보간법을 사용하여 0-1사이의 값으로 본 포시킨다.

### 2.2 구조적파괴에 의한 관별 중요도 산정 (PPFA)

대부분의 기존 연구가 상수관의 파괴에 의한 피해의 범위를 해당 상수관에만 한정했던 것에 반해 Jun (2005)은 Walski (1993)에 의해 제안된 관망의 부분적격리 (Segment)의 개념에 비의도적 구역고립 (Unintended Isolation) 정의를 도입하여 상수관의 파괴에 따른 실질적인 피해 영역을 추정했다. Walski (1993)에 의하면 Segment는 상수관이 파괴될 때, 파괴된 관과 함께 제수밸브에 의해서 차폐되는 주변 관의 집합으로 정의 할 수 있다. 즉, 한 파괴된 상수관을 격리시키기 위해 그 상수관에 인접한 관들도 함께 격리해야 할 경우 함께 격리되는 여러 상수관과 절점을 하나의 Segment로 정의 할 수 있다. 파괴된 상수관만을 대상으로 피해영역을 추정할 때는 파괴된 상수관만이 차폐되었을 경우에 한정되지만, 실제로는 상수관 차폐에 이용되는 제수밸브의 수와 위치에 따라 추가로 인근 관들이 차폐된다. 예를 들어 Fig. 2에서 P4가 파괴된다면 수리를 위해 제수밸브가 차폐되면서 인접한 P2 역시 차폐된다. 결과적으로 차폐된 Segment내에 있는 절점 N1에는 용수 공급이 단절되게 된다. 이와 같은 피해영역 추정방법은 제수밸브의 위치와 수를 고려할 수 있으므로 좀 더 현실에 가깝게

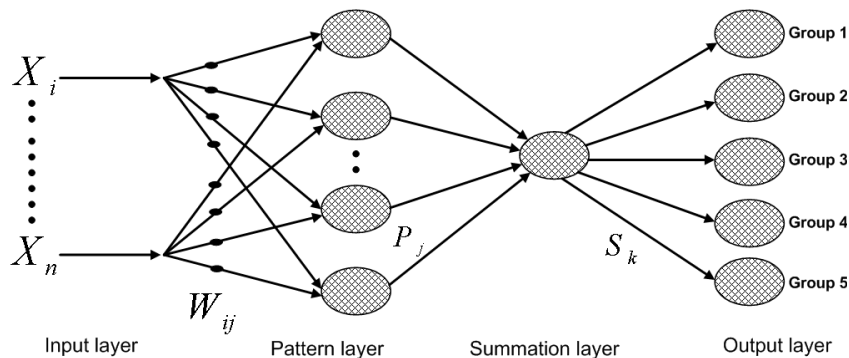


Fig. 1. Construction of PNN

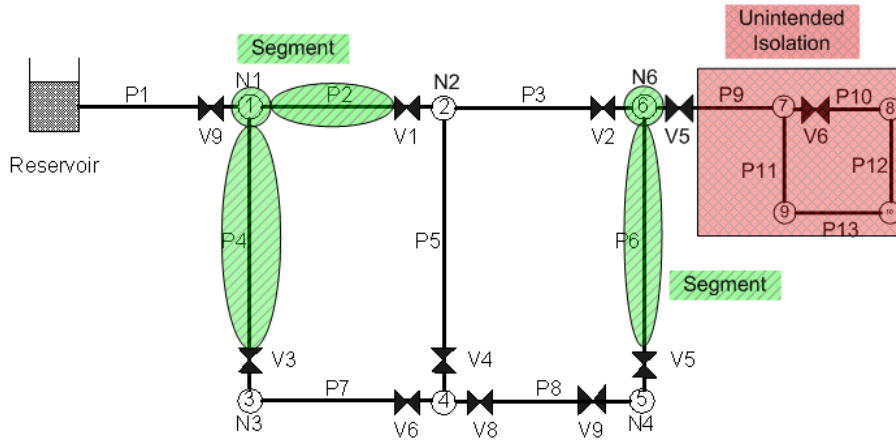


Fig. 2. Segment and Unintended Isolation

피해영역을 추정할 수 있다. 상수관 파괴 시 복구를 위하여 파괴된 관을 포함한 Segment를 차폐할 경우, 해당 Segment가 수원으로부터 유일한 경로일 경우에 연결된 하단부 관들은 수원으로부터 용수공급이 중단될 수 있다. 즉, 특정관들은 Segment의 차폐로 인하여 해당 관들의 용수공급 노선에 단절이 발생할 수 있다. Jun (2005)은 이러한 영역을 비의도적 구역고립으로 정의하였으며 이를 탐색하기 위하여 Breath first search 알고리즘을 한 단계 발전시켜 Node-Arc matrix를 기반으로 한 Updated Breath first search 알고리즘을 개발하였다. 비의도적 구역고립이 발생할 경우, 이 영역에 있는 용수 수요자는 파괴된 상수관의 복구까지 용수공급을 받지 못하므로 비록 제수밸브에 의해 차폐되지는 않았지만, Segment 내에 있는 용수 수요자와 마찬가지로 용수 공급을 받을 수 없다. Fig. 2에서 P6와 N6로 이루어진 Segment는 비의도적 구역고립을 발생시킨다.

구조적 파괴에 의한 상수관의 중요도를 산정하기 위하여 우선적으로 가정되어야 할 사항은 모든 개개 관로의 파괴 확률은 동일하며, 두 개 이상의 관이 동시에 파괴되지 않는다는 것이다. 또한 상수관망에 설치된 밸브의 오작동은 고려하지 않고 모두 정상적으로 작동한다고 가정한다. 이와 같은 가정들을 바탕으로 해당 상수관망에서 한 관로가 파괴 되었을 때 발생하는 Segment와 Unintended Isolation을 구하고 이를 모든 관로에 대하여 실행한다 (Pipe by Pipe Failure Analysis). 마지막으로 각 관로별로 다음의 식. 1과 같이 상수관의 중요도를 산정한다.

$$ISF_i (\text{Importance by Structural Failure}) = \frac{\sum F_S + \sum F_{UI}}{\sum F_P} \quad \text{식. 1}$$

- $ISF_i$  = 구조적파괴에 의한  $i$  상수관의 중요도
- $F_S$  = 정상상태에서 흐르는  $i$  상수관의 파괴에 의한 Segment의 유량
- $F_{UI}$  = 정상상태에서 흐르는  $i$  상수관의 파괴에 의한 Unintended Isolation의 유량
- $F_P$  = 정상상태에 흐르는 상수관의 유량

ISF 값이 크면 클수록 구조적 파괴에 의한 상대적 중요도는 크며, 작을수록 상대적 중요도는 낮다.

### 2.3 비구조적파괴에 의한 관별 중요도 산정 (EI)

조 (2007)는 일반적으로 수요량의 변화에 의해 해당 절점에 압력 변화가 발생하고 이 변화가 다른 절점에 큰 압력 변화를 야기 하는 곳에 압력계가 설치되어야 하는 지점이라고 제안하였다. 이는 시스템 전체에 많은 영향을 주는 지점으로 정의되어 질 수 있으며 이를 위하여 영향지수 (Effect Index)를 제안하였다. 즉 해당 절점의 수요량이 급격하게 변할 때와 같은 비구조적인 파괴로 인한 시스템 전체의 영향 정도를 파악한 것이다. 시스템 전체에 영향이 큰 지점은 상대적으로 중요한 지점으로 유지·보수의 입장에서 중요하게 관리 되어야 한다.

이 등 (1994)의 연구에 따르면 시간별 급수량 변화는 정규분포형을 따르므로 각 절점의 기본수요량 (Basedemand, 1시간 평균 급수량)을 평균으로 하고 부하율이 신뢰도 95%의 값을 갖는 분산을 이용하여, 해당 절점에서 발생할 수 있는 수요량 (Demand)의 범위를 정규분포형태로 나타낸다. 그리고 구해진 정규분포곡선을 이용하여 각 절점의 기본수요량

을 100개 무작위 발생시켜 EPANET을 수행하여 모든 절점의 압력을 산정한다. 이와 같은 과정을 모든 절점에 대하여 반복하고 아래의 식. 2에 따라 영향지수행렬을 획득한다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial p_{1,1}}{\partial p_1} & \frac{\partial p_{1,2}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial p_{1,j}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial p_{1,n}}{\partial p_1} \\ \frac{\partial p_{2,1}}{\partial p_2} & \frac{\partial p_{2,2}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_{2,j}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_{2,n}}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{i,1}}{\partial p_i} & \frac{\partial p_{i,2}}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial p_{i,n}}{\partial p_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{n,1}}{\partial p_n} & \frac{\partial p_{n,2}}{\partial p_n} & \dots & \frac{\partial p_{n,j}}{\partial p_n} & \dots & \frac{\partial p_{n,n}}{\partial p_n} \end{pmatrix} \quad \text{식. 2}$$

- $i$  = 영향을 주는 Node ID, 수요량을 변화시킨 절점 ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
- $j$  = 영향을 받는 Node ID, 기본수요량으로 고정시킨 절점 ( $j = 1, 2, \dots, n$ )
- $\partial p_{i,j}$  =  $i$  절점의 변화에 따른  $j$  절점의 최대압력과 최소압력의 차,  $Max(p_{i,j}) - Min(p_{i,j})$
- $\partial p_i$  = 수요량의 변화에 따른  $i$  절점의 최대압력과 최소압력의 차,  $Max(p_i) - Min(p_i)$
- $\frac{\partial p_{i,j}}{\partial p_i}$  =  $i$  절점의 압력변동폭에 대한  $j$  절점의 압력변동폭,  $i$  절점에 대한  $j$  절점의 민감도

절점별 영향지수는 영향지수행렬에서의 각 행의 값의 평균 값으로 나타나며, 영향지수는 임의의 절점에서 수두가 1m 변화했을 경우 상수관망 시스템 전체에 영향을 미치는 정도를 의미한다. 영향지수가 높은 절점에서 관의 파괴나 화재 진압을 위한 물 사용으로 인하여 절점의 수요량이 급작하게 증가하였을 경우 상수관망 전체에 많은 압력저하를 가져옴으로써 많은 절점들에서 기준 수압 이하로 내려가 비구조적파괴를 야기할 수 있는 가능성이 높음을 의미한다. 비구조적파괴에 의한 상수관의 중요도를 산정하기 위하여 앞서 설명한 절차에 따라 각 절점의 영향지수 (Effect Index)를 산정한다. 이 값을 이용하여 각 관로의 영향지수 (Effect Index)를 산정하기 위하여 관로의 양 끝단 절점의 영향지수를 식. 3과 같이 평균하여 산정한다. 영향지수 (Effect Index)의 값이 클수록 비구조적파괴에 의한 상수관의 중요도는 크며, 값이 작을수록 관로의 중요도는 작다.

$$INSF_i (\text{Importance by NonStructural Failure}) = \frac{\sum EI_{LN_i} + EI_{RN_i}}{2} \quad \text{식. 3}$$

- $INSF_i$  = 비구조적파괴에 의한  $i$  상수관로의 중요도
- $EI_{LN_i}$  =  $i$  상수관로의 왼쪽 절점의 영향지수
- $EI_{RN_i}$  =  $i$  상수관로의 오른쪽 절점의 영향지수

### 2.4 Utopian Approach와 최종 개량 우선순위 산정 방법

Utopian Approach는 Xanthopoulos (2000)가 제안한 거리척도 최소화에 기반한 다기준 그룹 의사결정 기법으로 Fig.

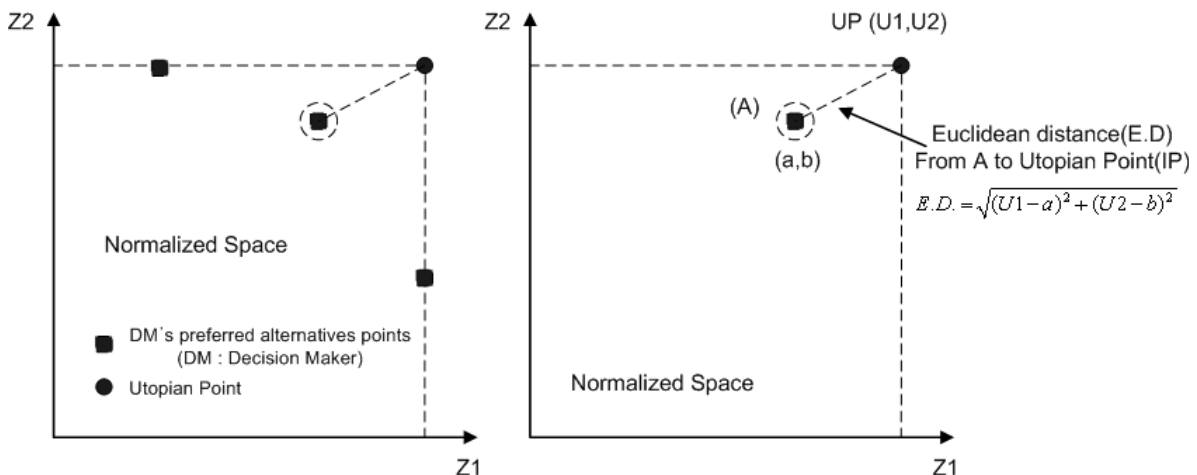


Fig. 3. Schematic diagram of Utopian Approach and Euclidean Distance

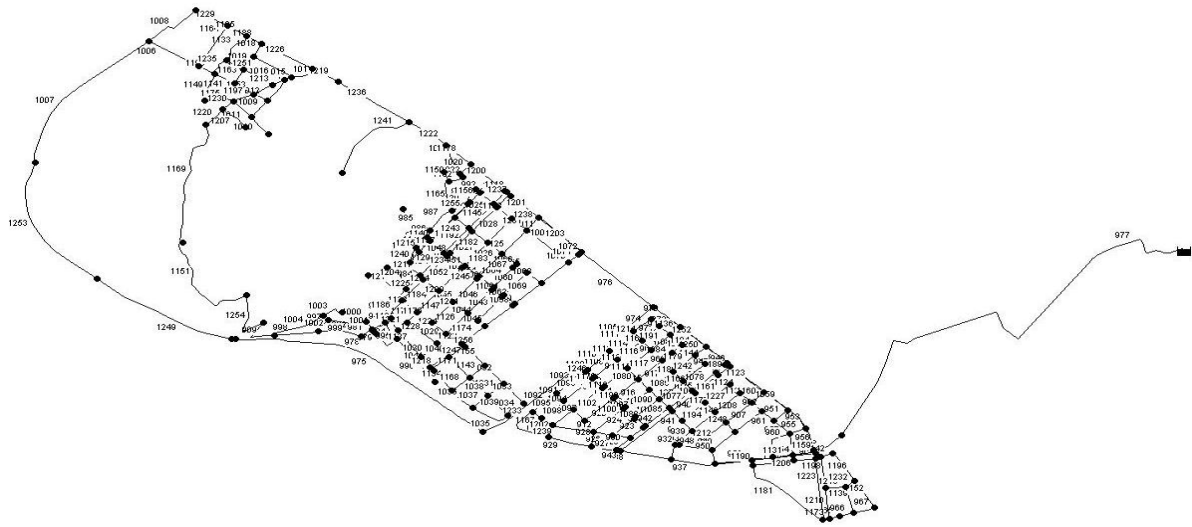


Fig. 4. KA network of J City

3과 같이 의사결정자들의 선호 대안들이 어느 한 영역에 집중되지 않고 제각각 흩어져 있어 의사결정자들의 의견을 종합하기 어려운 경우에 적당하다. 즉 Utopian Approach는 Fig. 3과 같이 정규화된 공간에 각 대안별 기준값을 나타낸 후, 이상점 (Utopian Point)과의 거리에 따라 의사결정문제의 우선순위를 결정하게 된다.

본 연구에서는 앞서 산정한 관체정보요인과 매설환경/외부요인에 의한 상수관의 노후도와 구조적파괴 및 비구조적파괴에 의한 상수관의 중요도를 좌표평면상에 나타내고, 이상점 (Utopian Point)과의 거리가 작은 순으로 정렬한 후, 이 순서를 개량 우선순위로 결정하게 된다. 좌표평면상에 나타내어지는 값은 0과 1사이의 값으로 정규화 되어 있으며, 1의 값은 노후화가 가장 많이 진행되어 있는 관로 혹은 상수관의 중요도가 가장 큰 관로이므로 이상점과의 거리가 가까울수록 우선 개량되어야 할 것이다.

### 3. 실제관망에의 적용 및 결과

#### 3.1 적용대상지역 현황

본 연구에서 제시한 모형을 2007년 수도정비 사업을 계획한 J시의 KA 배수구역에 적용하였다. J시는 전체 관망을 10개 대블럭과 130개 소블럭으로 구분하는 구역고립을 수행하고, 이 중 50개 소블럭 내의 노후관로를 교체 및 갱생하고, 상수도관련 시설물을 정비하는 것을 사업의 주용 내용으로 수립하였다. 10개의 대블럭 중의 하나인 KA 배수구역의 관로개수는 350개이며, 총 연장이 35.951km인 대형 상수

관망이다. 하루 공급량은  $16058.40m^3/day$ 이다. 절점의 개수는 230개이며, 설치된 밸브의 개수는 160개이다. Fig. 4에는 KA 배수구역의 관망도, 관로, 절점의 위치가 표시되어 있다. 하나의 수원지로부터 물을 공급받고 있으며, 수원지로부터 유입되는 주배수관로의 길이는 1,686m이다. 직경 300mm이상의 관은 24개이며, 대부분이 80mm이상의 직경을 가진 관으로 구성되어 있다.

#### 3.2 J시 KA 상수관망 적용 결과

##### 3.2.1 KA 배수구역 노후도 적용 결과

확률적 신경망 알고리즘을 이용하여 상수관의 노후도를 산정하기 위하여 관로별 관체정보요인과 매설환경/외부요인 입력 자료를 획득하였다. 그리고 확률적 신경망 알고리즘에 사용하기 위한 각 요인별 배점은 김 등 (2002), 김 등 (2002)을 기준으로 결정하였으며, 그 결과는 Table. 1과 같다. 또한 각 요인별 가중치는 전문가 설문조사에 의한 고유펙터법을 사용하여 구하였으며, 그 결과는 Table. 2에 제시되어 있다.

입력 자료를 이용하여 상수관의 노후도를 산정하였으며, 그 평균 값 결과를 Table. 3에 제시하였다. KA 배수구역의 경우 관체정보요인에 의한 파괴가능성 값의 평균이 0.7283으로 상당히 높게 나타난 것으로 보아 관로자체의 열화 및 노후화가 상당히 진행된 것으로 판단된다. KA 배수구역의 입력자료를 분석해 보면, 매설년도가 10년 이상 된 관이 197개로 그 비율이 56.29%에 이른다. 또한 과거 수질, 수압 등의 민원기록이 전체 관로 수의 72.86%인 255개에 존재

Table. 1 요인 별 배점

요 인	세부구분	배점 값	요 인	세부구분	배점 값	
관중	CI, CIP	1.00	수질, 수압 등 민원기록 (유/무)	유	1.00	
	PE, PVC	0.75		무	0.00	
	SP	0.50	최대수압 (kg/cm <sup>2</sup> )	5 이상	1.00	
	HI-3P	0.25		4 ~ 5	0.75	
	DCIP	0.00		3 ~ 4	0.50	
		2 ~ 3		0.25		
관경 (mm)	80 이하	1.00		2 이하	0.00	
	80 ~ 100	0.75	외부부식 (mm)	9 이상	1.00	
	100 ~ 150	0.50		6 ~ 9	0.75	
	150 ~ 250	0.25		4 ~ 6	0.50	
	250 이상	0.00		2 ~ 4	0.25	
내부부식 (mm)	-2 이하	1.00		2 이하	0.00	
	-2 ~ -0.5	0.75	토양종류	점성토	1.00	
	-0.5 ~ -0.3	0.50		실트	0.50	
	-0.3 ~ 0	0.25		사질토	0.00	
	0 이상	0.00	주변도로	산업도로	1.00	
20 이상	1.00	4차선도로		0.75		
15 ~ 20	0.75	2차선도로		0.50		
10 ~ 15	0.50	이면도로		0.25		
매설년도 (매설기간, 년)	5 ~ 10	0.25		보도 및 노지	0.00	
	5 이하	0.00	매설지역	공장	1.00	
	접속방식	용접		1.00	도로변	0.75
		고무링		0.50	상업지역	0.50
메카닉		0.00		APT	0.25	
누수 또는 밸브교체기록 (건/(년*m))	10 이상	1.00			주택가, 농경지	0.00
	7 ~ 10	0.75				
	3 ~ 7	0.50				
	0 ~ 3	0.25				
	0	0.00				

Table. 2 관체정보요인 과 매설환경/외부요인의 가중치

요 인	가중치	요 인	가중치
관중	0.359	수질, 수압 등 민원기록	2.008
관경	0.280	최대수압	1.296
내부부식	0.910	외부부식	1.474
매설년도	0.838	토양종류	0.855
접속방식	0.389	주변도로	0.595
누수 또는 밸브교체기록	1.919	매설지역	1.076

하고 있어 관로의 노후 정도가 심한 것으로 판단된다. 나머지 요인들 역시 관로의 매설기간이 장기화 되면서 전체적으로 내부부식 및 외부부식 정도, 최대수압의 크기가 큰 것으로 나타나 관체정보요인에 의한 파괴가능성만을 분석하였을 경우엔 KA배수구역 전체적인 관로의 노후 정도가 크다는 것을 알 수 있다.

그러나 매설환경/외부요인에 의한 파괴가능성의 값은 0.1884로 낮게 산정되었다. 이 값은 KA 배수구역의 매설환경이 비교적 양호함을 의미한다. 입력자료를 분석해 본 결과, KA 배수구역의 토양종류는 대부분 사질토로 노후화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 매설지역 역시 대부분 주택가나 상업지역으로 나타나 매설환경이나 외부요

Table. 3 상수관 노후도 및 중요도 산정 평균값

	노후도		중요도	
	관체정보요인	매설환경/외부요인	구조적파괴	비구조적파괴
평균	0.7283	0.1884	0.0832	0.4292
분산	0.1961	0.0636	0.0091	0.0285

Table. 4 구조적 파괴에 의한 중요도가 크게 나타나는 지점

Segment	Pipe ID	# of Pipes by U.I	중요도
1	908, 977	185	0.5538
2	975, 1104, 1105	174	0.6340
3	976	174	0.5868
4	1005, 1118	98	0.4582
5	1059	184	0.4156

인에 의한 파괴가능성은 크지 않은 환경임을 알 수 있다.

### 3.2.2 구조적 중요도 산정 결과

구조적파괴에 의한 상수관의 중요도를 산정하기 위한 밸브의 위치에 따른 Segment의 개수는 50개로 나타났다. 각각의 Segment가 파괴되었을 경우에 나타나는 구조적 중요도를 산정한 결과 Table. 3과 같이 구조적파괴에 의한 중요도 값이 전체적으로 낮게 산정된 것을 알 수 있다. 이는 주요 Segment를 제외한 나머지 Segment들의 구조적 중요도가 상대적으로 낮음을 의미한다. 그러나 KA 배수구역의 밸브 위치에 따라 908번과 977번 관로로 이루어진 Segment가 파괴될 경우, 무려 185개의 관로가 포함된 비의도적 유역고립이 발생하게 된다. 이에 따라 908번과 977번 관로의 경우 중요도가 0.5538로 상당히 높게 산정되었다. 이와 같이 상대적 중요도가 상당히 높게 산정되는 경우는 총 5가지의 경우가 있으며, Table. 4에 해당 Segment를 나타내었다. 이와 같은 Segment를 구성하는 관로들은 파괴나 비정상상태 발생 시 상당한 위험을 초래하게 되므로, 항시 유지관리되어야 한다. 하지만 이외의 다른 Segment의 경우 Segment를 구성하는 관로의 개수가 많지 않으며, 큰 비의도적 유역고립을 유발하지 않아 낮은 중요도가 산정되었다.

추가적으로, 구조적 중요도가 큰 관로의 경우 관로의 개량 시 관로 양쪽 끝에 밸브를 설치할 경우 Segment의 규모를 줄일 수 있으며 구조적 중요도를 줄여 전체 관망의 시스템 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

### 3.2.3 비구조적 중요도 산정 결과

비구조적파괴에 의한 중요도의 경우 전체적으로 고른 값인 0.4292가 산정되었다. 그러나 특히 946번 관로의 경우

0.9062의 큰 값이 산정되었다. 그 원인은 946번 관로의 양 끝 절점의 동수경사가 각각 63.7m와 63.6m로 전체 절점 중 가장 높은 값을 가지고 있어 수요량의 변화에 따른 압력변화가 가장 크게 나타났다. 이와 같이 비구조적 중요도가 큰 관로는 해당 양 끝 절점에 수요량의 급격한 변동 등의 비정상 상태가 발생되었을 경우, 상수관망 전체 시스템에 큰 영향을 준다. 따라서 이와 같은 관로는 다른 관로에 비하여 상대적으로 중요하게 관리 되어야 하며, 우선적으로 개량보수 되어야 한다.

### 3.2.4 Utopian Approach에 의한 개량우선순위 산정결과

노후도와 구조적 중요도 및 비구조적 중요도 결과를 바탕으로 Utopian Approach를 실행하여 개별관로의 개량우선순위를 산정하였다. Table. 5는 Utopian Approach를 적용한 결과 나타난 상위 20개의 우선개량 대상관의 각 항목별 결과 값을 나타냈으며, Fig. 5는 우선 개량되어야 할 20개의 관로를 나타낸 그림이다. 본 연구방법에서는 관체정보요인과 매설환경/외부요인에 의한 상수관로의 노후도와 구조적 및 비구조적 파괴에 의한 상대적 중요도의 값이 0-1로 정규화되어 나타났으며, 이 네 가지의 항목별 가중치를 동일하게 가정하였다. 그 결과, 전체적으로 노후도가 크며 이와 동시에 구조적 및 비구조적 파괴에 의한 상대적 중요도도 큰 관로들이 우선 개량 되어야 하는 것으로 나타났다. 그러나 Table. 3과 Table. 5에서 나타난 것과 같이, 구조적 파괴에 의한 상수관로의 중요도의 경우 상위 5개의 값과 나머지 관로들의 값의 차이가 다른 항목들에 비하여 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이에 따라 우선순위가 높게 산정된 관로는 대체적으로 길이가 길고 구역과 구역을 연결하는 관이 많았다. 이는 구조적 파괴에 의한 상수관의 중요도를 고려한 것이 결과에 그대로 반영된 것으로 해석될 수 있다.



Table. 5 개량우선순위 산정 결과 (상위 20개)

개량 우선순위	관 번호	거리척도	노후도		중요도	
			관체정보요인	매설환경/외부요인	구조적 파괴	비구조적 파괴
1	976	0.6291	1.0000	0.5718	0.5868	0.7958
2	1104	0.8112	1.0000	0.5718	0.6340	0.4162
3	1105	0.8112	1.0000	0.5718	0.6340	0.4162
4	1005	0.9284	1.0000	0.5718	0.4582	0.3796
5	1075	0.9584	1.0000	0.7126	0.1292	0.7211
6	1118	0.9608	1.0000	0.5653	0.4582	0.3362
7	936	0.9884	0.9996	0.5440	0.1292	0.8964
8	935	1.0091	0.9996	0.5440	0.1292	0.7716
9	938	1.0157	0.9997	0.7126	0.1292	0.5631
10	937	1.0460	1.0000	0.7126	0.1292	0.4968
11	963	1.0460	1.0000	0.7410	0.1292	0.4816
12	1131	1.0478	1.0000	0.7410	0.1292	0.4779
13	1072	1.0490	1.0000	0.5440	0.0867	0.7584
14	1093	1.0512	0.9984	0.5653	0.1292	0.6027
15	943	1.0519	1.0000	0.5567	0.1292	0.6105
16	1092	1.0544	0.9984	0.5653	0.1292	0.5945
17	1071	1.0628	0.9997	0.5440	0.0867	0.7042
18	1233	1.0683	0.9963	0.5653	0.1292	0.5594
19	929	1.0733	0.9963	0.5653	0.1292	0.5475
20	964	1.0764	1.0000	0.7410	0.1292	0.4228

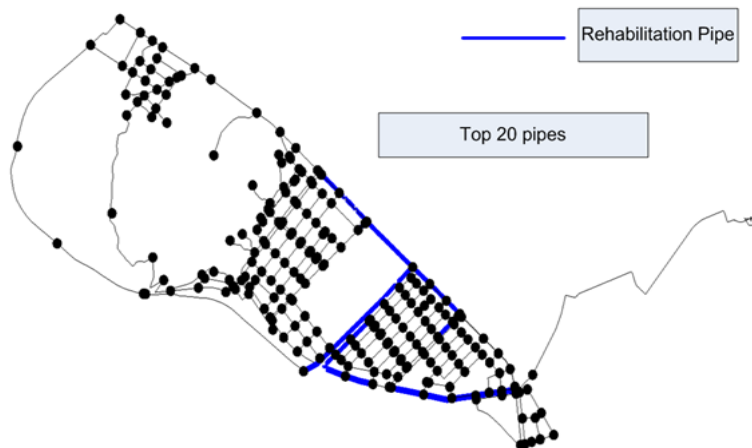


Fig. 5. Top 20 pipes to be rehabilitated

## 4. 결론

본 연구에서는 기존의 상수관망 개량우선순위 산정방법에서 관로의 노후도만을 절대적 중요도로 사용하는 단점을 보완하고, 수리학적 중요도를 추가적으로 고려하여 개량우선순위 결정을 보다 더 신뢰성 있게 할 수 있는 기법을 제안하였다. 즉, 기존 노후도 및 파괴가능성 산정 방법에 상수관의 구조적 및 비구조적파괴에 의한 상수관의 중요도 개념을 개량우선순위 모형에 접목하여 개량우선순위를 산정하였다는 것에 그 의의가 있다. 또한 본 연구의 방법을 수도정비사업을 계획한 J시 KA 배수구역에 적용하여 그 결과를 분석하여 적용성을 판단하여 보았다. 본 연구의 결론 및 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 상수관의 노후도를 관체정보와 매설환경/외부요인에 따른 노후도로 구분하여 산정하였다. 파괴가능성을 산정하기 위하여 확률적 신경망 (PNN) 방법을 사용하였다. 이를 J시 KA 배수구역에 적용한 결과, KA 배수구역의 경우 관체정보 요인에 의한 노후 정도가 큰 것으로 나타났으며, 매설환경/외부요인에 따른 노후도는 비교적 양호한 것으로 나타났다.

(2) 상수관의 개량우선순위 산정 시 구조적 파괴와 비구조적 파괴에 의한 상수관의 중요도를 고려하였으며, 수리학적 중요도를 개량우선순위 산정에 접목시켰다. 구조적 파괴에 의한 상수관 중요도는 Segment와 비의도적 유역고립의 개념을 사용하여 Segment의 격리에 따른 시스템의 수리학적 영향정도를 파악하였다. 비구조적 파괴에 의한 중요도는 수요량의 급격한 변동에 따른 시스템 전체에 미치는 영향을 판단하는 Effect Index (영향지수)를 이용하여 산정하였다. 이와 같은 상수관의 상대적 중요도는 개량우선순위 산정 시 물리적 노후도 뿐 만 아니라, 어떤 관이 상대적으로 중요하며, 중요하지 않은지를 판단하는 개념으로 개량우선순위 산정 시 반드시 고려되어야 한다. 이를 KA 배수구역에 적용한 결과 구조적 파괴에 의한 상대적 중요도가 상당히 큰 관로가 존재하여 이 관로가 최종 개량우선순위 산정에 큰 영향을 미친 것을 알 수 있었다.

(3) 상수관망 개량우선순위 산정을 위하여 다기준의사결정기법의 하나인 Utopian Approach를 이용하여 상수관망 개량우선순위를 관별로 산정하였다. 적용 결과, 전체적으로 물리적 노후도뿐만 아니라, 구조적 및 비구조적 파괴에 의한 상대적 중요도가 큰 관로들의 개량우선순위가 높게 나타났다. 그러나 본 연구에서는 물리적 노후도와 상대적 중요도의 가중치를 동일하게 고려하였으므로, 추후 이에 대한 연구가

필요할 것으로 판단된다.

(4) 제안된 방법을 실제관망인 J시의 KA 배수구역에 적용하여 그 적용성을 판단하고 관별 개량우선순위를 산정하고 그 결과를 분석한 결과, 노후도뿐만 아니라 수리학적 상대적 중요도를 고려하여 개량우선순위 결정을 보다 더 신뢰성 있게 할 수 있는 기법을 제안한 것으로 판단된다.

본 모형의 적용결과, 상수관의 노후도뿐만 아니라 상수관의 구조적 및 비구조적파괴에 의한 중요도를 고려함으로써 보다 현실적인 개량우선순위를 산정할 수 있었으며, 방대한 자료가 필요하고 복잡한 기존의 파괴확률 및 수학 모델에 의한 개량우선순위 모델에 비하여 적용이 쉽고 간단하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 사업인 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구(ECORIVER21)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

## 참고문헌

- 김응석 (2002) *상수도관의 노후도 예측에 근거한 최적 개량 모형 개발*, 박사학위논문, 고려대학교.
- 김응석, 김중훈, 박무종, 김정환 (2002) 상수관로 노후도 조사 방법 개발, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 22(5B), pp. 657-670.
- 김응석, 김중훈, 이현동 (2002) 상수관로의 노후도 영향인자 및 가중치 산정에 관한 연구, *대한상하수도학회논문집*, 대한상하수도학회, 16(6), pp. 686-699.
- 김주환 (2003) 상수관 노후도 평가방법 개선 방안 연구, *한국수처리기술연구회논문집*, 한국 수처리기술연구회, 11(2), pp. 63-73.
- 박수완 (2007) 상수도 배수관로 시스템의 장기적 유지관리를 위한 방법론과 컴퓨터 알고리즘의 개발 및 적용, *수질보전 한국물환경학회지*, 한국물환경학회, 23(3), pp. 356-366.
- 백천우 (2002) *ReHS를 이용한 상수관망 최적 개량 의사결정 시스템의 개발*, 석사학위논문, 고려대학교.
- 이경훈, 이삼노, 문병석 (1994) 1일 상수도 급수량의 변화와 확률 분산 모형에 관한 연구, *한국수자원학회 학술발표회논문집*, 한국수자원학회, pp. 405-409.
- 조문수 (2007) *u-city 구축을 위한 발전된 상수관망 운영시스템 개발*, 석사학위논문, 고려대학교.
- 한국상하수도협회 (2004) *상수도시설기준*, 한국상하수도협회.

- 한국수자원공사 (1995) 수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발, 한국 수자원공사.
- AWWARF (1986) *Guidance Manual Water Mains Evaluation for Rehabilitation/Replacement*. AWWARF.
- Burn, L. S., Tucker, S. N., Rahilly, M., Davis, P., Jarrett, R. and Po, M. (2003) Asset planning for water reticulation systems—the PARMS model, *Water Science & Technology : Water Supply*, **3**(1-2), pp. 55-62.
- David H. Marks, Robert M. Clark (1987) "A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems : Theory.", *Adv. Water Resources*, Vol. 10, March, pp. 2-10.
- Deb, A. K., Hasit, Y. J., Grablutz, F.M., and Herz, R. K. (1998) *Quantifying future rehabilitation and replacement needs of water mains*. Report to the American Water Works Association Research Foundatino, Roy F. Weston, Inc., West Chester, PA, USA.
- Huynh Trung Luong, Okitsugu Fujiwara (2002) Fund allocation model for pipe repair maintenance in water distribution networks, *European Journal of Operational Research*, **136**, pp. 403-421.
- Jun, H.D. (2005) *Strategic valve locations in a water distribution system*, Doctoral dissertation, Blacksburg, Virginia.
- Malandain J., Le Gauffre P., Miramond M. (1998) 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*, Monreal, Canada, pp. 1013-1024.
- Newland (2000) *A Methodology for Optimal Replacement of Pipes in Water Distribution Networks*, Doctoral dissertation, Blacksburg, Virginia.
- Shamir, U. and Howard, C. D. (1979) An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement, *Journal of the American Water Works Association*, **71**(5), pp. 248-258.
- Specht (1990) "Probabilistic Neural Network." *Neural Networks*, Vol. 3, pp. 109-118.
- Su Wan Park and G. V. Loganathan (2002a) Methodology for Economically Optimal Replacement of Pipes in Water Distributuion Systems : 1. Theory, *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, **6**(4), pp. 539-543.
- Su Wan Park and G. V. Loganathan (2002b) Methodology for Economically Optimal Replacement of Pipes in Water Distributuion Systems : 2. Application, *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, **6**(4), pp. 545-550.
- UtilNets (1997) *Reliability-Based Decision Support System for the Maintenance Management of the Underground Network of Utilities*, Final Technical Report, Computer Technology Institute.
- Walski, T. M (1982) Economic Analysis of Rehabilitation of Water Mains, *Journal of Water Resources Planning and Management*, **108**(3), pp. 296-304.
- Walski, T.M. (1993) Water distribution valve topology for reliability analysis, *Reliability engineering and system safety*, **42**(1), pp. 21-27.
- Water Research Centre (1989) *Planning the Rehabilitation of Water Distribution Systems*, Water Research Centre.
- Xanthopoulos,Z., Melachrinoudis,E. and Solomon,M.M., (2000) Interactive Multiobjective Group Decision Making with Interval Parameters, *Management Science*, **46**(12), pp. 1721-1732.