

상수관로 개량 우선순위 수립을 위한 퍼지 기법

Fuzzy Techniques to Establish Improvement Priorities of Water Pipes

박수완 / 김태영** / 임기영*** / 전환돈****

Park, Su Wan / Kim, Tae Young / Lim, Ki Young / Jun, Hwan Don

Abstract

In this paper important factors in determining improvement priorities for water pipes were categorized into the effects of a pipe failure to entire pipe network and the characteristics of individual pipe. Subsequently, mathematical models that can quantify these factors were developed using the Fuzzy techniques. The effects of a pipe failure to entire pipe network and the characteristics of individual pipe that were estimated by Fuzzy techniques were coined as Fuzzy Importance Index and Fuzzy Characteristic Index, respectively. The Fuzzy Characteristic Index was further categorized into Fuzzy Deterioration Index and Fuzzy Difficulty Index. Considerations were given to applying weights to specific factors in the developed model depending on the circumstances of model applications. To provide an example of the methodology an example pipe network, Net3, of the EPANET program was used. The Fuzzy Importance Index (FII) and Fuzzy Deterioration Index (FDI) were calculated for the Net3 network by considering the hydraulic effects of a pipe failure on the entire pipe network and the pipe deterioration as one of the individual pipe characteristics. Subsequently, the improvement priorities of the pipes in the Net3 pipe network were established based on the FII and FDI.

Keywords : fuzzy deterioration index, fuzzy difficulty index, fuzzy importance index, improvement priorities, water pipes

요 지

본 논문에서는 상수관로의 개량(교체 또는 갱생) 우선순위를 결정하는데 있어서 평가되어야 할 인자 또는 요소를 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향 및 개별관로의 특성으로 구분하였고, 이들을 퍼지기법을 적용하여 정량적으로 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 퍼지기법으로 산정되는 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향을 관로의 퍼지 중요도로 정의하였으며, 개별관로의 특성은 관로의 퍼지 특성도로 정의하였다. 퍼지 특성도는 다시 퍼지 노후도 및 퍼지 난이도 등으로 구분하여 산정할 수 있게 하였다. 한편, 각 평가요소를 퍼지기법으로 산정함에 있어서 적합한 평가대상이 차지하는 비중에 따라 평가대상의 가중치를 고려할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 개발된 방법론의 적용예를 제시하기 위하여 EPANET 관망분석 프로그램의 예제 관망으로 제공되는 Net3 관망을 이용하였다. 관로의 파손이 전체 관망에 미치는 수리학적 영향과 개별 관로의 특성 중의 하나인 관로의 노후도를 Net3 관망 내 관로 개량 우선순위 결정에 고려하여야 할 요소로 선정하여 Net3 관망 내 관로의 퍼지 중요도(Fuzzy Importance Index, FII) 및 퍼지 노후도(Fuzzy Deterioration Index, FDI)를

* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목공학 전공 부교수 (e-mail: swanpark@pusan.ac.kr)

Associate Professor, Department of Civil Eng., Pusan National University, Busan 609-735, Korea

** 로신저지, 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 박사과정

Corresponding Author, Department of Civil Eng., Pusan National University

*** 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 석사수료

Department of Civil Eng., Pusan National University

**** 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수

산정하였으며, 이를 이용하여 Net3 관망내 관로의 개량 우선순위를 수립하였다.

핵심용어 : 퍼지 노후도, 퍼지 난이도, 퍼지 중요도, 개량 우선순위, 상수관로

1. 서 론

2009년 전국 유수율은 82.6%, 특히 특·광역시외의 경우 86.2%로 다른 시 및 군지역에 비교하여 높은 유수율을 나타내고 있으나, 다른 선진국과 비교해서 낮은 유수율을 보이고 있다. 이로 인해 연간 658백만 m^3 (수돗물 평균생산단가 기준으로 약 4,013억원/년)의 막대한 수돗물 생산비용 및 수자원의 손실이 발생하고 있으며 (환경부, 2010), 이것은 상수관로의 유지관리에 있어서 관로의 노후화 등에 인한 것으로서 상수시설의 양적인 팽창 이전에 질적인 측면을 간과해 온 결과이다.

과학적인 상수관로의 유지관리를 위하여 상수관로 개량 (교체 또는 갱생) 우선순위 선정에 관한 연구가 계속되어 왔는데, 지금까지 연구된 상수관로 개량 우선순위 선정에 관한 연구를 세분화하면 경제적 분석 기법, 관로의 노후도와 파괴가능성 분석 기법, 회귀분석 및 파괴 확률 분석 기법, 관로의 노후도와 수리학적 중요도를 동시에 분석하는 기법 및 퍼지기법을 적용한 노후도 분석 기법 등이 있다. 이 중에서 유도근 등 (2010)은 본 논문에서 고려하고 있는 관로의 노후도와 관로의 수리학적 상대적 중요도를 동시에 고려하여 관로 개량우선순위를 결정하는 기법을 제안하였으며, 최종적인 관로별 개량 우선순위 산정을 위하여 이상점과 대안사이의 거리를 기준으로 우선순위를 결정하는 Utopian Approach를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 퍼지이론 (fuzzy theory)은 1935년 미국 캘리포니아 대학의 Zadeh (1965)에 의해 처음으로 제안되었는데, 지금까지 퍼지이론을 사용하여 상수관망에 적용한 연구를 세분화하면 퍼지기법을 이용한 관로 노후도 평가모델과 상수관로 수리분석모델로 구분할 수 있다. Kleiner et al. (2006)는 관로 직접 평가자료를 분석하여 관로의 노후도를 선정하는데 퍼지기법을 이용하였으며, 시간에 따른 관로의 상태 변화를 마르코프 모델을 이용하여 예측할 수 있는 방법론을 개발하였다. 또한, Yan and Vairavamorthy (2003)은 퍼지 및 인공지능 이론을 이용하여 수도관 노후화와 관련된 인자들의 불확실성을 설명하였고, 노후화 정도를 평가하는 전문가 시스템을 개발하였다.

상수관망의 수리분석에 퍼지기법을 적용한 연구는 상

수관망의 설계에 있어 적절한 절점의 압력을 모의하기 위해 선형 삼각퍼지집합에 상수관망 설계비용을 최소화하기 위해 선형 프로그래밍을 결합한 Goulter and Bouchart (1988), 설계비용을 최소화하기 위하여 동적 프로그래밍 알고리즘에 수입과 유속에 대한 제약위반 정도를 정의하는 퍼지기법을 적용한 Vamvakieridou-Lyroudia (1996), 유전자 알고리즘의 퍼지추진 기법을 상수관망 설계비용 최소화를 위한 최적화 모델로 적용하고 유전자 알고리즘에 따른 수입과 유속에 대한 제약 위반 정도를 퍼지 멤버십 함수로 대체한 Vamvakieridou-Lyroudia (2003) 등이 있다.

이와 같이 현재까지 상수관망과 관련된 분야에서는 관로의 노후도 분석과 관망의 수리학적 분석에 퍼지기법을 적용한 연구가 있으나, 관로의 효율적인 유지관리를 위한 체계적 방법론으로서의 퍼지분석 기법의 개발에 관한 연구는 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 관로 개량 우선순위 결정 방법론의 개발에 퍼지기법을 적용하는데 있어서 고려하여야 할 기준 또는 요소에 대해 체계적으로 고찰하고, 이러한 요소들을 퍼지기법을 적용하여 정량적으로 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 관로 개량 우선순위 결정에 고려하여야 할 요소를 정량화하기 위한 모형은 EPANET 에제 관망에 적용하여 개발된 모형과 방법론의 적용 예를 제공하였다.

2. 관로 개량 우선순위의 결정에 고려되어야 할 요소

노후관로를 개량함에 있어 노후화된 정도에 따라 개량 시기를 선정하고 개량계획을 수립하는 것도 중요하나, 관로의 파손이 전체 상수관망의 수리학적 거동에 미치는 영향도 매우 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 보다 합리적인 관로 개량계획 수립을 위해서는 관로의 노후도 뿐만 아니라 관망 내에서 관로의 중요성도 함께 고려되어야 한다. 이 외에 고려되어야 할 사항으로는 개량계획을 원활하게 수행할 수 있는가를 나타내는 관로에의 접근성과 개량작업 수행의 난이도를 들 수 있다.

위 내용을 정리하면, 관로 개량 우선순위를 결정하는데 있어 고려할 수 있는 중요한 요소들은 크게 (1) 관로의 파

손이 전체관망에 미치는 영향 및 (2) 개별관로의 특성으로 나타낼 수 있다. 여기서 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향은 관망의 절점에서 요구되는 수요일이 모두 만족되는 정상상태(normal condition)하의 모든 절점에서의 유량, 수압 및 잔류염소 등과 같은 세부평가요소의 값과 관로의 파손과 같은 비정상적 관망 운영상태(abnormal condition)하의 모든 절점에서의 유량, 수압 및 잔류염소 등과 같은 세부평가요소 값의 차이를 각각 퍼지기법으로 등급화하여 정량적으로 나타낼 수 있다.

한편 개별관로의 특성은 관로의 노후도 및 개량작업 시행의 난이도 등과 같은 관로 유지관리에 관련된 개별관로에 대한 특성을 퍼지기법으로 등급화하여 정량적으로 나타낼 수 있다. 예를 들어, 노후도는 관종, 관경, 내·외부코팅, 매설년도, 토양종류, 주변 도로종류 및 접속방식 등과 같은 세부평가요소의 상태(condition state)를 퍼지기법에 따라 등급화하여 정량적으로 나타낼 수 있으며, 비슷한 방법으로 개량작업 시행의 난이도는 관로에의 접근성, 시민의 인식수준, 교통통제의 용이성, 단수로 인한 영향 및 비용 등과 같은 세부평가요소의 상태를 퍼지기법에 따라 등급화하여 정량적으로 나타낼 수 있다.

한편, 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향 및 개별관로의 특성을 산정함에 있어서 각 경우에 적합한 평가대상이 차지하는 비중에 따라 평가대상의 가중치를 고려할 필요가 있다. 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향은 각 절점에 대해 산정되므로 절점들이 평가대상이 되며, 절점을 통해 상수도를 공급받는 소비자의 성격 및 기능에 따라 다른 가중치를 각 절점에 대해 부여할 수 있다. 개별

관로의 특성 산정에 사용되는 평가대상을 위 단락에서 언급한 관로 노후도 및 개량작업 시행의 난이도 평가를 위한 세부평가요소들이며 각 세부평가요소의 상대적 중요성에 따라 다른 가중치를 각 세부평가요소에 부여할 수 있다.

퍼지기법을 이용하여 등급화한 세부평가요소의 상태와 평가대상의 가중치를 합성함으로써 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향과 개별관로의 특성을 정량적으로 산정할 수 있으며, 이러한 방법으로 산정되는 결과를 각각 관로의 퍼지 중요도(Fuzzy Importance Index, FI) 및 관로의 퍼지 특성도(Fuzzy Characteristics Index, FCI)로 정의하였다. 이상과 같이 서술한 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향 및 개별관로의 특성 산정에 관련된 내용을 요약하면 Table 1과 같다.

3. 관로 개량 우선순위 결정을 위한 모형

3.1 관로의 퍼지 중요도 산정을 위한 모형

관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향은 모든 절점에서의 정상상태하의 세부평가요소 값과 비정상상태하의 세부평가요소 값의 차이와 정상상태하의 세부평가요소 값의 비율, 즉 세부평가요소 값의 변동비율을 퍼지기법을 사용하여 정량화함으로써 산정할 수 있다. 각 절점에서의 유량, 압력 및 잔류염소와 같은 세부평가요소에 대한 변동비율은 Eq. (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_{Fi} = \frac{F_{in} - F_i}{F_i} \quad (1)$$

Table 1. Important Factors in Determining Water Pipe Improvement Priorities and Their Characteristics

Factors		Sub-factors	Subject of Weighting	Result of the Application of the Fuzzy Techniques	
Effects of a Pipe Failure on Entire Pipe Network		Flow, Pressure, Residual Chlorine, etc.	Nodes	Pipe Fuzzy Importance Index	
Characteristics of Individual Pipe	Pipe Deterioration	Material, Diameter, Internal and External Coating, Installation Year, Soil Type, Road Type, Joint Type, etc.	Sub-factors	Pipe Fuzzy Characteristics Index	Pipe Fuzzy Deterioration Index
	Difficulty of Performing Pipe improvement	Accessibility to Pipe, Awareness of Citizens, Easiness of Traffic Control, Effects of Water Supply Suspension, Costs, etc.			Pipe Fuzzy Difficulty Index

여기서 R_{Fi} 는 절점 i 에서 세부평가요소 F 에 대한 변동비율, F_i 는 절점 i 에 정상 운영상태 하의 세부평가요소 F 의 값, F_{in} 는 절점 i 에 비정상 운영상태 하의 세부평가요소 F 의 값을 나타낸다. 퍼지기법을 이용하여 이러한 절점에 대한 세부평가요소 값에 대한 변동비율은 그 크기에 따라, 예를 들어 'Substantially Low', 'Very Low', 'Low', 'Fair', 'High', 'Very High', 및 'Substantially High'와 같은 등급으로 표현될 수 있다.

세부평가요소의 하나인 유량은 관망의 정상 운영상태에서는 관망의 정상상태 모의를 위해 절점에 주어진 수요량을 나타내고, 비정상 운영상태에서는 관망의 비정상상태 모의 시 절점의 수압 정도에 따라 달라지는 공급 가능한 유량을 말한다. 한편, 관망 내 절점은 절점을 통해 상수도를 공급받는 소비자의 성격 및 기능에 따라 그 중요도가 달라질 수 있다. 절점에 대한 중요도를 고려한 관로의 각 세부평가요소의 각 변동비율 등급에 대한 소속 정도 (EPF, Effects of Pipe Failure)는 Eq. (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$(EPF_i)_l = (WN_1, WN_2, \dots, WN_m) \otimes \begin{bmatrix} H_{11}^i & H_{21}^i & \dots & H_{n1}^i \\ H_{12}^i & H_{22}^i & \dots & H_{n2}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1m}^i & H_{2m}^i & \dots & H_{nm}^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \left(\bigvee_{j=1}^m WN_j \cdot H_{ij}^i \right)$$

여기서, \otimes 는 매트릭스 곱, $(EPF_i)_l$ 는 l 번째 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향을 세부평가요소 (유량, 압력, 잔류염소 등) r 의 변동비의 등급에 대한 소속 정도를 구한 벡터, $i=1, 2, \dots, n$, n 은 세부평가요소에 대한 등급의 개수, m 은 절점의 개수, WN_j 는 절점 j 의 가중치 (Weight of Node), H_{ij}^i 는 절점 j 에서 세부평가요소 r 의 변동율이 i 번째 등급에 소속되는지의 여부를 나타내는 0 또는 1의 값을 나타낸다.

평가대상인 절점의 중요도를 나타내는 각 절점별 가중치는 절점에서 발생하는 수요량이 전체 관망의 수요량에 대해 차지하는 비율로 가정하여 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

$$WN_i = \frac{Q_i}{Q} \quad (3)$$

여기서, WN_i 는 i 번째 절점의 가중치, Q_i 는 i 번째 절점의 정상운영상태 하의수요량, Q 는 상수관망 전체의 수요량을 나타낸다.

한 관로의 파손이 전체관망에 미치는 영향 (DEPF, Defuzzified Effects of Pipe Failure)은 Eq. (2)로 구한 각 세부평가요소의 변동 등급에 대한 소속 정도를 각각 Eq. (4)와 같은 가중평균법 (weighted average method)으로 비퍼지화 (defuzzification) 시켜 구할 수 있다.

$$(DEPF)_l = \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i w_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right)_l \quad (4)$$

여기서, $(DEPF)_l$ 은 세부평가요소 (유량, 압력, 잔류염소 등) r 에 대한 비퍼지화된 l 번째 관로의 중요도, n 은 세부평가요소 r 에 대한 l 번째 관로의 중요도 등급의 개수, m 은 세부평가요소 r 에 대한 l 번째 관로의 중요도 등급에의 소속값, w 는 세부평가요소 r 에 대한 l 번째 관로의 중요도 등급의 대못값을 나타낸다.

Eq. (4)에 따라 관망 내 모든 관로에 대해 각 세부평가요소의 변동 등급에 대한 소속 정도를 비퍼지화한다. 관로의 퍼지 중요도 (FI, Fuzzy Importance Index)는 관로의 각 세부평가요소, 즉 유량, 압력 및 수질평가인자 등에 대해 Eq. (2)를 이용하여 산정한 각 세부평가요소의 변동 비율 등급에 대한 소속 정도를 Eq. (4)를 이용하여 비퍼지화하고, 각 세부평가요소별로 비퍼지화된 수리학적 중요도를 Eq. (5)에 따라 합산함으로써 얻을 수 있다.

$$FI_l = \sum_{r=1}^s (DEPF)_l \quad (5)$$

여기서, s 는 세부평가요소의 개수를 나타낸다.

3.2 관로의 퍼지 특성도 산정을 위한 모형

관로의 퍼지 특성도는 관로 유지관리에 관련된 개별관로의 특성을 퍼지기법을 적용하여 산정하는 것으로서, 관로의 노후도 및 개량작업 시행의 난이도 등과 같은 개별관로의 특성을 퍼지기법을 적용하여 나타낼 수 있다. 예를 들어 퍼지기법을 적용하여 관로의 노후도를 산정하기 위해 관중, 관경, 내·외부코팅, 매설년도, 토양종류, 주변도로종류 및 접속방식과 같은 각 세부평가요소를 관로의 퍼지 중요도 산정방법과 같이 'Substantially Low', 'Very Low', 'Low', 'Fair', 'High', 'Very High', 및 'Substantially High'와 같은 등급으로 구분한다. 또한 같은 방법으로 개량작업 시행의 난이도를 산정하기 위하여 관로에의 접근성, 시민의 인식수준, 교통통제의 용이성 및 비용과 같은

세부평가요소를 관로의 노후도의 경우와 같이 몇 가지 등급으로 구분할 수 있다.

한편, 관로의 노후도 및 개량작업 시행의 난이도와 같은 개별관로의 특성은 그 세부평가요소의 중요도에 따라 다른 가중치를 적용할 수 있다. 관로의 퍼지 특성도는 Eq. (6)을 이용하여 각 세부평가요소의 중요도를 고려한 각 세부평가요소의 등급에 대한 소속 정도(CIP, Characteristics of Individual Pipe)를 구한 다음, 이를 비퍼지화하여 구할 수 있다.

$$(CIP)_i = (WF_1, WF_2, \dots, WF_s) \otimes \begin{bmatrix} H_1^1 & H_1^2 & \dots & H_1^n \\ H_2^1 & H_2^2 & \dots & H_2^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_s^1 & H_s^2 & \dots & H_s^n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \left(\bigvee_{j=1}^s WF_j \cdot H_j^i \right)$$

여기서, $(CIP)_i$ 는 i 번째 관로의 특성도를 평가요소(노후도, 개량작업 시행의 난이도등)의 등급에 대한 소속 정도로 구한 벡터, i 는 1, 2, ..., n , n 은 세부평가요소에 대한 등급의 개수, s 는 세부평가요소의 개수, WF_j 는 세부평가요소 j 의 가중치, H_j^i 는 j 번째 세부평가요소의 상태가 i 번째 등급에 소속되는지의 여부를 나타내는 0 또는 1의 값

을 나타낸다.

4. 적용 대상 관망 및 분석 절차의 개요

본 연구에서 개발된 방법론의 적용예를 제시하기 위하여 EPANET 관망해석 프로그램(Rossman, 2000)의 예제 관망으로 제공되는 Net3 관망을 이용하였으며, 관로의 파손이 전체 관망에 미치는 수리학적 영향과 개별 관로의 특성 중의 하나인 관로의 노후도를 관로 개량 우선순위 결정에 고려하여야 할 요소로 선정하였다. 따라서 Net3 관망 내 관로의 퍼지 중요도(Fuzzy Importance Index, FII) 및 퍼지 노후도(Fuzzy Deterioration Index, FDI)를 산정하였으며, 이를 이용하여 Net3 관망내 관로의 개량 우선순위를 수립하였다.

Net3 관망의 정상상태 시 총 공급유량은 0.69 cu. m/sec이며, 그 구성요소를 살펴보면, 수원은 2개, 탱크는 3개가 있으며, 2개의 수원 앞에는 펌프가 설치되어 있다. 총 절점은 91개, 관로의 개수는 119개이다. 이 관망에 대하여 밸브 설치율을 40%라고 가정하여 Fig. 1과 같이 93개의 밸브를 ● 표시로 관망에 임의적으로 배치하였다.

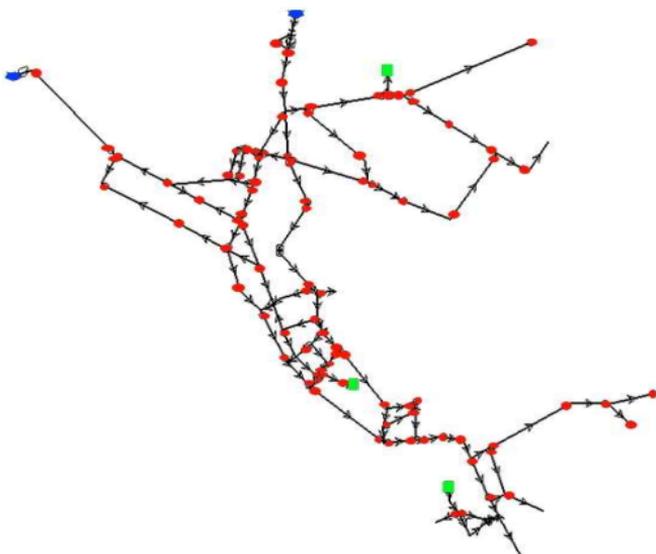


Fig. 1. Map of the EPANET Net3 Water Pipe Network with Assumed Valves

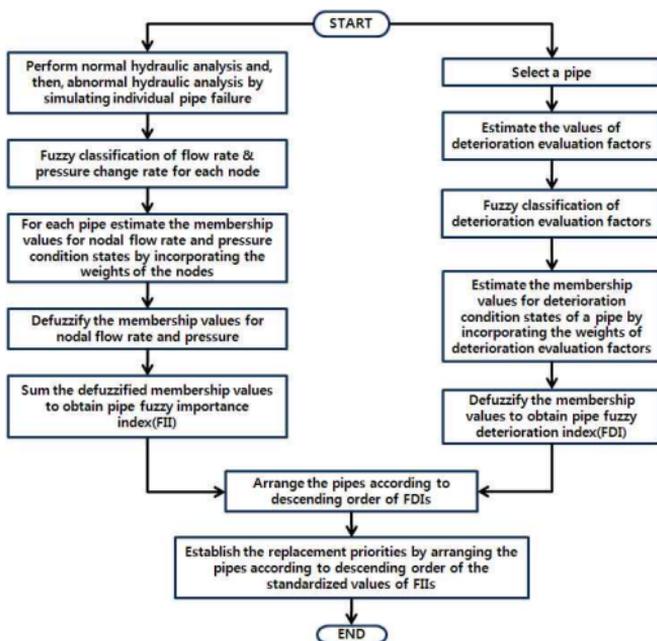


Fig. 2. Procedures of Estimating the Fuzzy Importance Index and Fuzzy Deterioration Index

Fig. 2는 관로의 퍼지 중요도 및 퍼지 노후도를 산정하기 위한 절차를 개략적으로 나타낸다.

관로의 퍼지 중요도를 산정하기 위해 필요한, 관로가 파손되었을 때와 같은 비정상운영상태 하의 관망 수리모의(hydraulic simulation)를 절점에서의 수두와 가능 용수공급량을 동시에 계산하는 PDA (Pressure-Driven Analysis) 기법 사용이 가능한 WaterGEMs 수리모형 프로그램 (Bentley Systems, Inc. 2005)을 사용하였다. 각 관로의 퍼지 중요도를 산정하기 위하여 관망 수리모의를 실시할 때 마다 하나의 관로가 파손된 것으로 가정하였고, 파손된 관로의 수리를 위하여 인접한 밸브가 차단되어 그 관로에는 물이 공급되지 않는 것으로 가정하였다. 이러한 방법을 관망 내 모든 관로에 적용하여 모든 관로에 대한 퍼지 중요도를 산정하였다. 또한 퍼지 중요도와 노후도를 산정하기 위한 등급들의 멤버십 함수로는 삼각 퍼지 함수를 사용하였다.

5. 퍼지 중요도 및 퍼지 노후도 산정 과정

5.1 퍼지등급의 산정

각 절점에서의 정상상태와 비정상상태의 유량과 수압에 대한 변동비율을 구분하기 위한 등급에 관한 기준은 Table 2와 같다. 이러한 유량 및 수압의 변동비율을 구분하는 등급을 대표하는 값은 'Substantially High'를 대표하는 값을 1로 하고 이를 등급의 개수인 6으로 나누어 구하였다.

관로의 퍼지 노후도는 각 관로를 노후도 세부평가요소의 등급에 따라 분류한 후 세부평가요소의 가중치를 고려하여 각 관로가 노후도 등급에 소속되는 정도를 구한 후 이를 비퍼지화하여 구하였다. 본 연구에서는 상수도 관망 진단 매뉴얼 (환경부, 2007)의 구조적 안정성에 관한 전문 기술진단 (관체의 노후도)의 내용 중 간접평가인자를 노후도 평가를 위한 세부평가요소로 정의하였다. 이 매뉴얼

Table 2. Definition of the Condition State for Flow and Pressure Change Rate at a Node

Sub-factor	Flow or Pressure Change Rate(CR)	Condition State	Representing Value
Flow or Pressure at Node	$-0.082 \leq CR$	Substantially Low	0.00
	$-0.249 \leq CR < -0.082$	Very Low	0.17
	$-0.400 \leq CR < -0.249$	Low	0.33
	$-0.582 \leq CR < -0.400$	Fair	0.50
	$-0.749 \leq CR < -0.582$	High	0.67
	$-0.915 \leq CR < -0.749$	Very High	0.83
	$-1.000 \leq CR \leq -0.915$	Substantially High	1

Table 3. Weights for Deterioration Evaluation Sub-factors for Pipes

Sub-factor	Weight	Sub-factor	Weight
Material	0.30	Soil Type	0.04
Diameter	0.10	Road Type	0.04
Internal Coating	0.10	Joint Type	0.02
External Coating	0.05	Leak/Failure Record	0.20
Installation Year	0.15		

에서 간접평가인자는 관종, 관경, 내·외부코팅, 매설년도, 토양종류, 주변도로종류, 접속방식 그리고 누수 및 파손기록의 총 9가지로 세분화 되어 있다. 이에 관경, 주변도로 종류, 접속방식은 6등급으로, 관종, 내부코팅, 매설연도는 5등급으로, 토양종류는 4등급으로 외부코팅은 3등급으로 분류하였다. 한편 Net3관망에 관한 자료는 관종 및 관경이 유일하므로 Net3관망의 관로들에 대해서 관종 및 관경을 제외한 나머지 세부평가요소들은 적절히 가정하여 각 관로에 부여하였다. 또한 상수도 관망진단 매뉴얼(환경부, 2007)에서 제공하고 있는 인자들의 노후도 평가에 대한 값을 이용하여 본 논문에서는 각 세부평가요소의 상태에 대한 등급의 개수를 세부평가요소에 따라 3~7개로 정의하였다. Table 3은 각 세부평가요소별 가중치를 나타낸 것으로 이는 노후수도관 평가 및 관리 매뉴얼(2002) 등을 참고하여 산정된 것이다.

5.2 EPANET 여제관망에 대한 퍼지 중요도 및 퍼지 노후도 산정 결과

본 논문의 Eq. (2)에 따라, Eq. (3)을 이용하여 구한 절점별 가중치를 Table 1을 이용하여 구한 유량과 압력 각각의 등급에 대한 소속여부와 합성함으로써 각 관로의 파손에 따른 영향을 절점의 유량과 압력의 변동비율 등급에

대한 소속 정도를 산정하였다. 다음으로 이러한 각 관로의 유량 또는 압력 변동비율의 등급에 대한 소속 정도의 집합을 비퍼지화 방법 중 하나인 가중평균법을 이용하여 각 관로의 퍼지 중요도를 구하였다.

각 관로의 노후도 세부평가요소의 각 등급에 대한 소속여부와 Table 3과 같이 구한 관로 세부평가요소별 가중치를 Eq. (6)에 따라 합성함으로써 각 관로의 노후도 등급에 대한 소속 정도를 산정하였다. 다음으로 이러한 각 관로의 노후도 등급에 대한 소속 정도의 집합을 비퍼지화 방법 중 하나인 가중평균법을 이용하여 각 관로의 퍼지 노후도를 구하였다.

관로의 퍼지 중요도 및 퍼지 노후도를 산정하기 위한 방법의 예를 들기 위해 Net3 관망 내 123번 관로에 대해 설명하면 다음과 같다. 먼저, 123번 관로의 퍼지 중요도 산정과정은 다음과 같다. Net3관망내의 123번 관로가 파손되었다고 가정할 후, WaterGEMs를 이용하여 각 절점에서 발생한 유량 및 수압의 변동비율을 Table 1을 이용하여 등급으로 나타내면 Table 4와 같다.

123번 관로의 절점압력 변동비율의 등급에 대한 소속 정도는 Table 4와 같이 구한 각 절점의 압력 변동비율의 등급과 Eq. (3)을 이용하여 구한 각 절점별 가중치를 Eq. (2)에 적용하여 구할 수 있으며, 그 결과는 삼각 퍼지합수

Table 4. Classification of Nodal Flow and Pressure Due to Failure of Pipe No.123

Node No.	Normal Operation		Abnormal Operation		Change Rate		Class	
	Demand (m ³ /sec)	Pressure (m)	Flow (m ³ /sec)	Pressure (m)	Flow	Pressure	Flow	Pressure
15	0.039112	28.7	0.023782	5.5	-0.39194	-0.8084	Low	Very High
35	0.103267	40.9	0.080747	9.2	-0.21808	-0.7751	Very Low	Very High
101	0.016086	31.6	0.002839	0.5	-0.82353	-0.9842	Very High	Substantially High
103	0.011229	31.3	0.001199	0.2	-0.89326	-0.9936	Very High	Substantially High
:	:	:	:	:	:	:	:	:
247	0.005930	37	0.005930	21.2	0.00	-0.4270	Substantially Low	Fair
251	0.002019	33.3	0.002019	18.4	0.00	-0.4474	Substantially Low	Fair
253	0.004605	31.5	0.004605	21.6	0.00	-0.3143	Substantially Low	Low
255	0.003407	34.3	0.003407	24.3	0.00	-0.2915	Substantially Low	Low

의 각 멤버십 등급 (Substantially Low, Very Low, Low, Fair, High, Very High, 및 Substantially High)에 해당하는 멤버십 값 (0.0076, 0, 0.0119, 0.0563, 0.5283, 0.3391, 0.0569)으로 산정된다. 이를 이용하여 압력에 대한 관로의 중요도를 가중평균법으로 구하면 0.7243이 되며 그 관계식은 Eq. (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 (DEPF^v)_{123} &= \left(\frac{\sum_{i=1}^7 m_i w_i}{\sum_{i=1}^7 m_i} \right)_{123} \\
 &= \frac{0.0076 \times 0 + 0 \times 0.17 + 0.0119 \times 0.33 + 0.0563 \times 0.5 + 0.5283 \times 0.67 + 0.3391 \times 0.83 + 0.0569 \times 1}{0.0076 + 0 + 0.0119 + 0.0563 + 0.5283 + 0.3391 + 0.0569} \\
 &= 0.7243
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, $(DEPF^v)_{123}$ 는 압력에 대한 비퍼지화된 123번 관로의 수리학적 중요도, m 은 압력에 대한 123번 관로의 각 중요도 등급에의 소속값, w 는 압력에 대한 123번 관로의 각 중요도 등급의 대푯값을 나타낸다.

유량에 대한 관로의 중요도도 압력에 대한 관로의 중요도 산정과 동일한 방법으로 구하였다. 유량에 대한 관로의 중요도는 0.7131로 산정되었으며, 123번 관로의 퍼지 중요도들은 Eq. (4)에 따라 유량에 대한 관로의 중요도와 압력에 대한 관로의 중요도를 합산하여 1.4369로 구하였다.

관로의 퍼지 노후도 산정과정은 다음과 같다. 가정한 123번 관로의 각 노후도 세부평가요소를 이용하여 각 노후도 세부평가요소에 대한 등급을 나타내면 Table 5와 같다.

123번 관로의 노후도 등급에 대한 소속 정도는 Table 5와 같이 구한 각 노후도 세부평가요소의 등급과 Table 4의 각 노후도 세부평가요소에 대한 가중치를 Eq. (5)에 적

용하여 구할 수 있으며, 그 결과는 삼각 퍼지함수의 각 멤버십 등급 (Substantially Low, Very Low, Low, Fair, High, Very High, 및 Substantially High)에 해당하는 멤버십 값 (0, 0.1, 0.56, 0.2, 0.26, 0.06)으로 산정된다. 이를 이용하여 Eq. (4)와 같은 방법으로 관로의 퍼지 노후도를 가중평균법으로 구하면 0.4895로 산정된다.

관로의 퍼지 중요도가 퍼지 노후도와 같은 범위의 값을 가지도록 하기 위하여 Eq. (8)에 따라 관로의 퍼지 중요도를 0.0~1.0 사이의 값으로 변환하여 표준화 (standardization)

Table 5. Classification of the Pipe Deterioration Evaluation Sub-factors for Pipe No.123

Sub-factor	Property	Class
Material	DCIP	Low
Diameter (mm)	762 (30 inch)	Low
Internal Coating	Cement mortar	Very Low
External Coating	Coal tar enamel	Fair
Installation Year	1986	Very High
Soil Type	Clay	Substantially High
Road Type	Highway	Very High
Joint	Coating after welding	Very Low
Leak/Failure Record	2.19	Low

Table 6. Pipe Improvement Priorities for the Pipes in Net3 Network (the Highest 20 Pipes)

Pipe ID	Importance with Respect to Flow	Importance with Respect to Pressure	Fuzzy Importance Index (FII)	Standardized Fuzzy Importance Index	FII Ranking	Fuzzy Deterioration Index (FDI)	FDI Ranking	Replacement Priority
325	0.5249	0.4895	1.1830	0.7062	4	0.7433	1	1
285	0.0199	0.0300	0.0499	0.0298	52	0.7433	1	2
209	0.0113	0.0135	0.0254	0.0151	77	0.7333	3	3
199	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	109	0.7333	3	4
235	0.4550	0.4872	0.9607	0.5735	13	0.7300	5	5
121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	109	0.7300	5	6
145	0.0000	0.0101	0.0736	0.0439	43	0.7200	7	7
243	0.0190	0.0256	0.0516	0.0308	50	0.7150	8	8
103	0.0139	0.0166	0.0305	0.0182	75	0.7150	8	9
221	0.0160	0.0214	0.0402	0.0240	62	0.7133	10	10
217	0.0160	0.0214	0.0402	0.0240	62	0.7100	11	11
119	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	109	0.7100	11	12
153	0.0000	0.0198	0.0211	0.0126	85	0.7000	13	13
263	0.0014	0.0021	0.0034	0.0020	103	0.6933	14	14
213	0.0000	0.0000	0.0005	0.0003	106	0.6900	15	15
179	0.0023	0.3991	0.6136	0.3663	22	0.6867	16	16
315	0.5249	0.4895	1.1830	0.7062	4	0.6767	17	17
317	0.0000	0.0000	0.0014	0.0009	105	0.6733	18	18
323	0.4243	0.4290	0.8646	0.5161	17	0.6667	19	19
330	0.0000	0.1609	0.2425	0.1448	27	0.6667	19	20

된 관로의 퍼지 중요도를 구하였다.

$$\delta = \frac{d - d^{\min}}{d^{\max} - d^{\min}} \quad (8)$$

여기서, δ 는 표준화된 관로의 퍼지 중요도, d 는 관로의 퍼지 중요도, d^{\min} 는 관로의 퍼지 중요도 중 최소값, d^{\max} 는 관로의 퍼지 중요도 중 최대값을 나타낸다.

Net3 관망내 관로에 대한 개량 우선순위는, 이 관망의 관리자가 관망의 수리학적 거동보다 관망의 노후도를 개선시키는데 더 큰 비중을 두고 관로 개량계획을 수립한다고 가정하여, 먼저 관로의 퍼지 노후도를 내림차순으로 정렬한 다음, 퍼지 노후도가 같은 값을 가지는 관로들을 표준화된 관로의 퍼지 중요도에 따라 내림차순으로 정렬하여 구하였다.

6. 고찰 및 결론

본 논문에서 개발한 퍼지 기법을 적용하여 EPANET Net3 관망내 관로에 대한 개량 우선순위를 결정할 본 논문의 고찰 및 결론은 다음과 같다.

- 1) 개발한 퍼지 기법을 EPANET Net3 관망내 관로에 적용한 결과 먼저 관로의 퍼지 노후도를 기준으로 개량 우선순위를 정한 다음 퍼지 중요도를 적용하여, 퍼지 노후도가 같은 값을 가지는 관로들에 대해서도 관로의 개량 우선순위를 결정할 수 있었다.
- 2) 상수관로의 파손으로 인하여 관로 내 물의 체류시간이 변할 수 있고, 이에 따라 절점에서의 잔류염소량이 허용 잔류염소량에 미치지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 추후의 연구에서는 절점의 유량과 압력의 변화뿐만 아니라 잔류염소량과 같은 수질의 변화도 관로의 퍼지 중요도를 산정하기 위한 평가인자로 고려하여야 할 것으로 사료된다.
- 3) 본 논문에서는 관로의 퍼지 중요도와 퍼지 노후도를 함께 고려하여 관로의 개량 우선순위를 산정하였다. 관로의 퍼지 중요도 및 퍼지 노후도 외의 다른 기준, 즉 본 논문에서 예로 든 관로 개량작업 시행의 난이도를 관로의 개량 우선순위 결정에 포함시킬 수 있으며, 관로 개량작업 시행의 난이도의 정량화에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.
- 4) 개별 관로의 개량우선순위를 산정함에 있어 여러 개의 기준이 사용될 경우에는 그 기준의 다양성으로 인하여 개량우선순위가 달라질 수 있다. 따라서 보다 합리적인 관로 개량우선순위 수립을 위해서

다기준 의사결정기법과 같은 방법을 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

- 5) 본 논문에서는 제안한 방법론을 EPANET 예제관망에 적용하였으나, 차후 연구에서는 현장데이터가 갖추어진 실제 대규모 관망에 적용하여 개발된 퍼지 기법과 방법론의 실제 관망에 대한 적용성을 검토하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

- 유도근, 전완돈, 김중훈 (2010) "Utopian Approach를 이용한 상수관망 개별관로 개량우선순위 산정에 관한 연구." **상하수도학회 논문집**, 상하수도학회, 제24권, 제2호, pp. 183-193.
- 환경부 (2002). 노후수도관 평가 및 관리 매뉴얼, 환경부.
- 환경부 (2007). 상수도 관망진단 매뉴얼, 환경부.
- 환경부 (2010). 상수도 통계, 환경부.
- Bentley Systems, Inc. (2005). *WaterGEMS for GIS User's Guide: GEOSPATIAL WATER DISTRIBUTION MODELING SOFTWARE* DAA035880-1/0001, Haestad Methods Solution Center, Watertown, CT.
- Goulter, I.C., and Bouchart, F. (1968). "Fuzzy programming in water distribution network design." *Proceedings of 1st Conf on Computer Methods and Water Resources*, Rabat, Morocco, D. Ouazar, C.A. Brebbia, and H. Barthel, eds., Vol. 2, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, pp. 33-44.
- Kleiner, Y., Rajani, B., and Sadiq, R. (2006). "Failure risk Management of buried infrastructure using fuzzy-based techniques." *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, IWA, Vol. 55, No. 2, pp. 81-94.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET2 Users Manual*, EPA/600/R-00/057, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Vamvakieridou-Lyroudia, L.S. (1995). "Fuzzy reasoning in water supply network optimisation." *Proceedings*

4th International Conf on the Application of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering, Cambridge, U.K., Civil-Comp Press, Edinburgh, U.K., pp. 255-262.

Vamvakieridou-Lyroudia, L.S. (2003) "Optimal extension and partial renewal of an urban water supply network using fuzzy reasoning and genetic algorithms." *Proceedings 30th IAHR Congress*, pp. 329-336.

Yan, J.M, and Vairavamorthy, K. (2003). "Fuzzy Approach

for Pipe Condition Assessment." New Pipeline Technologies, Security, and Safety, *Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction*, Baltimore, Maryland, ASCE, Vol. 1, pp. 466-476.

Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets." *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.

논문번호: 11-089	접수: 2011.08.02
수정일자: 2011.10.13	심사완료: 2011.10.13