



퍼지함수와 PDA 모형을 이용한 비상시 용수공급 성능지표 개발

A Development of Supply Performance Indicator in a Water Distribution System Using Fuzzy Sets and a PDA Model

옥수연* · 유광태** · 노헌승*** · 전환돈****

Oak, Sueyeun*, You, Kwangtae**, Noh, HunSeung***, and Jun, Hwandon****

Abstract

The water distribution system is an infrastructure system supplying water to urban areas. Since it has a great influence on the quality of life and financial aspect of customers, the performance evaluation of the system for an efficient management and operation is essential. Until now, most of the suggested performance indicators for the system are based on the available demand and pressure at demand nodes obtained from the hydraulic simulation. However, those performance indicators based on the hydraulic simulation may not consider the actual usability of water for customers properly. Therefore, in this study, the application of fuzzy functions along with the available demands at demand nodes, which are obtained from the hydraulic simulation, from the various points of view, makes us possible to evaluate the system performance by depending on the set value of the variables. For this purpose, we use a PDA model, which can simulate various abnormal operation conditions and suggest two performance indicators: the possible water supply range indicator (PWSRI) for the water supply performance evaluation for an individual demand node and the possible water supply indicator for the entire system (PWSIES). The suggested method and indicators are applied to the real water distribution system of A-city in Korea to verify the applicability.

Key words : Water Distribution System, Hydraulic Analysis, Pressure Driven Analysis, Performance Indicator, Fuzzy Function

요 지

상수관망 시스템은 국내 전역에 용수를 공급해주는 사회기반시설로, 수요자의 삶의 질과 경제에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 시스템으로 효율적인 관리와 운영을 위한 성능 평가가 필수적이다. 기존에 제안된 상수관망의 성능 평가를 위한 지표는 수리학적 해석을 통해 계산된 절점의 공급가능 유량 및 압력을 기반으로 한다. 그러나, 이와 같은 공급가능유량을 위주로 한 수리학적 성능 평가지표는 실제 수요자가 느끼는 용수의 사용성에 미치는 영향을 고려하기 힘들다. 따라 본 연구에서는 수리학적 해석을 통한 절점별 공급 가능 유량에 퍼지함수를 적용하여, 변수 조합에 따라 다양한 관점에서 공급 성능을 평가할 수 있는 새로운 공급 성능 지표를 제안하였다. 이를 위하여 다양한 비정상상황을 모의할 수 있는 PDA 수리해석 모형을 이용하여, 개별 절점의 공급 성능 평가를 위한 공급 범위 기준 성능 지표(PWSRI)와 전체 관망의 공급 성능을 평가할 수 있는 공급 가능량 기준 성능 지표(PWSIES)를 제안하였다. 또한 제안된 성능 지표들을 A시의 관망의 배수지 문제발생 시나리오에 적용하여 그 사용성을 검증하였다.

핵심용어 : 상수관망, 수리해석, Pressure Driven Analysis, 성능지표, 퍼지함수

*정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정(E-mail: sueyeun@seoultech.ac.kr)
Member, Master Course, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**정회원, (주)유엔유, 대표이사(E-mail: kty.unu@gmail.com)
Member, UnU Co., Ltd, Chief Executive Officer

***한국토지주택공사 동탄사업본부 과장(E-mail: no1211@lh.or.kr)
Korea Land & Housing Corporation, Assistant Manager

****교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수(Tel: +82-2-970-6570, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

1. 서 론

현재 국내 상수관망의 총연장은 197,535 km이며 급수인구는 52,045천명으로, 총인구의 98.8%에 대하여 상수를 보급하고 있어 일부 도서산간 지역을 제외한 경우 100%에 가까운 급수율을 보인다(Ministry of Environment Korea, 2015). 이와 같은 관망 시스템은 중요한 역할을 담당하는 사회기반 시설로, 단수 없는 안정적 공급 및 안전한 물 공급을 추구한다. 용수의 공급은 해당 지역 주민들의 삶의 질과 경제에 직접적인 영향을 끼치기 때문에, 이를 효율적으로 관리하고 운영하기 위한 시스템의 성능 평가가 필수적이며 이를 통하여 관망 시스템의 상황 파악 및 진단을 통한 개량, 보수의 필요성을 확인할 수 있다. 아울러, 각종 비정상상황에서의 성능 평가를 통하여 피해저감 대책 수립 및 저감효과 정량화를 통한 의사 결정에 이바지할 수 있다. 이에 관하여 성능 평가에 관한 연구가 다수 진행되었으며, 일부 국가에서는 이에 따라 성능 평가 지수들을 개발하여 시스템을 관리하고 있다.

IWA(2006)는 2차에 걸쳐 상수관망의 Performance Indicator (PI)를 조사하여 발간하고 있으며, 도/송수 시스템 및 배/급수 관망을 포함한 모든 상수관망에 대하여 다양한 조건을 평가하기 위하여 많은 종류의 PI를 제시하고 있다. 하지만 제안한 모든 PI를 적용하는 것에는 현실적인 무리가 있다고 판단되며, 일부 PI의 경우에는 실질적인 자료의 수집이 어렵다는 한계가 있다. Marques and Monteiro(2001)은 상수관망의 운영주체에 대한 평가 및 재정적인 측면을 고려할 수 있는 지표를 포함한 총 50개의 PI를 제시하였으며 Jun(2005)은 관 파괴에 따른 영향을 바탕으로 한 Segment 개념이 적용된 7개의 상수관망 효율성 지수를 제안하였다. 이외에도, 일본의 수도기술연구센터 JWRC(1998)는 시스템 개선을 위한 대책방안 검토를 위하여 상수관망의 평가방법을 제안하였다.

위와 같은 다양한 상수관망의 수리학적 성능 평가지표는 기본적으로 상수관망의 수리학적 모의결과를 기반으로 하고 있다. 즉, 상수관망의 운영상 발생할 수 있는 여러가지 시나리오를 도출한 후 그러한 시나리오가 발생했을 때의 수리학적 모의결과를 이용한다. 이때 도출이 되는 모의결과는 PDA의 경우 절점별 공급가능유량 및 수압이다. 그러나, 이와 같은 공급가능유량을 위주로 한 수리학적 성능 평가지표는 단순한 공급가능비율(%)이며 이 비율이 실제 용수의 사용성에 미치는 영향은 고려되지 않는다. 즉, 필요수량 대비 50%와 90%의 차이가 단순한 비율로만 산정되어 있고 실제 수요자가 느끼는 용수의 사용성을 평가하지는 못한다. 수요자 입장에서 필요수량 대비 90%는 대부분의 경우에 큰 차이나 불편함을 느끼지 못하지만, 50%로 줄게 되면 90%에 비해서 상당한 불편함을 느낄 가능성이 높다. 기존의 수학적 지표는 이러한 차이를 반영하기 힘든 문제가 있는 바, 퍼지개념을 추가하여 이와 같은 용수사용성의 저하정도

를 평가할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 관망의 수리학적 성능 평가를 위하여 소비자의 공급가능물의 민감성을 감안할 수 있는 다양한 퍼지함수를 활용한 용수 공급 성능 지표를 제안하였다. 또한 비정상상황에서의 적용이 가능한 PDA 관망 해석기법을 적용하여 A시의 배수지 문제 발생 시나리오에 대한 공급 성능 지표를 계산해 비정상상황에서의 적용성을 확인하였다.

2. 용수 공급 성능 지표 개발을 위한 이론적 배경

2.1 퍼지함수 이론

퍼지이론은 소속도 함수를 이용하여 대상을 분류하는 집합론으로써, 기존의 이분법적인 사고가 갖는 오류를 보완해줄 수 있다. 이 개념은 1965년 Lotfi Zadeh에 의하여 제안되었으며, 인간의 언어를 컴퓨터로 표현하고 처리하고자 제안된 새로운 형태의 인공지능 이론으로 인간의 사고방식과 유사한 방법으로 대상을 평가할 수 있다. 참 혹은 거짓으로 이분화 된 값만을 갖는 Crisp 논리와 반대되는 개념으로, 부분적으로 참 혹은 부분적으로 거짓에 속하는 정도를 나타낼 수 있다. 이 정도는 소속 함수(membership function)를 정의하여 소속되는 정도를 0에서 1 사이의 값으로 표기되며, 대응되는 대상과 함께 표기된다. 소속 함수는 대상 및 자료의 특성에 따라 다양한 형태로 정의될 수 있다.

본 연구에서는 ESRI사의 ArcGIS10에서 사용 중인 퍼지 소속 함수를 활용하였으며, 해당 함수들은 변수 값을 수정하여 함수의 형태를 변형시킬 수 있다. 해당 함수의 종류 및 특징은 Table 1과 같다. 대표적인 변수 값으로는 spread값과 mid-point 값이 있으며, 해당 변수에 할당되는 값에 따라 함수의 형태가 결정된다. Spread(f_1) 값은 시그모이드 곡선의 분포정도로, 퍼지 소속 함수의 값이 0에서 1까지 상승(하강)하는 정도 및 기울기를 나타낸다. Mid-point(f_2) 값은 시그모이드 곡선의 중간 값으로, 해당 값을 기준으로 곡선이 분포된다. 해당 변수들은 전문가, 공급자 및 사용자의 의견에 따라 수정 가능한 변수이다. 아울러, Hedge를 사용하여 매우, 얼마간, 꽤, 다소, 조금과 같은 부사를 포함하는 형태의 함수로 변형시킬 수 있다.

2.2 관망의 수리해석 기법

상수 관망의 수리학적 해석 방법에는 크게 수요량을 기반으로 하는 Demand Driven Analysis (DDA) 기법과, 압력 기반인 Pressure Driven Analysis (PDA) 기법이 있다. DDA는 수요량을 고정 인자로 하는 수리해석 기법으로써, 개별 절점에서의 수요량을 100% 만족시킨 상황에서의 압력을 연속방정식과 순환방정식으로 계산한다. 해당 기법은 대부분의 상수관망 수리해석 프로그램에 적용되며, 그 예로는 Rossman (2000)이 개발한 EPANET2.0 및 Wood(1980)의 KYPIPE

Table 1. Characteristic of Fuzzy Membership Function (Gary et al., 2010)

Membership Function	Description	Definition
Linear	A linear increasing or decreasing membership between two inputs.	$\mu(x) = 0$, if $x < \min$, $\mu(x) = 1$, if $x > \max$, otherwise $\mu(x) = \frac{(x - \min)}{(\max - \min)}$ where, max and min : user inputs
Large (Small)	Sigmoid shape where large(small) inputs have large membership	Large: $\mu(x) = \frac{1}{1 + (\frac{x}{f_2})^{-f_1}}$ / Small: $\mu(x) = \frac{1}{1 + (\frac{x}{f_2})^{f_1}}$ where f_1 : spread, f_2 : midpoint
MS Large (Small)	Sigmoid shape defined by the mean and standard deviation where large(small) inputs have large memberships	MS Large: $\mu(x) = 1 - \frac{bs}{x - am + bs}$ if $x > am$ MS Small: $\mu(x) = 1 - \frac{bs}{x - am + bs}$ if $x > am$ otherwise $\mu(x) = 0$, where m : mean, s : standard deviation, a and b : multipliers
Near	A curved peak of membership over an intermediate value	$\mu(x) = \frac{1}{1 + f_1(x - f_2)^2}$, where f_1 : spread, f_2 : midpoint
Gaussian	A Gaussian peak of membership over an intermediate value	$\mu(x) = e^{-f_1(x - f_2)^2}$, where f_1 : spread, f_2 : midpoint
Somewhat (Very)	Applied to slightly adjust a membership function	Somewhat: Square root of membership Very: Membership squared

Table 2. Comparison of DDA and PDA Hydraulic Analysis

	DDA	PDA
Primacy of Hydraulic Analysis	Nodal Demand	Nodal Pressure
Available Demand	Customers Demand	Calculated by HOR
Reliability in Abnormal Condition	Low	High
Application	Normal operating condition	Normal/Abnormal operating condition
Drawback	Produce unrealistic results in abnormal operating condition	Requires extensive field data

등이 있다. 이는 정상상태인 관망의 수리해석 시에는 문제가 없으나, 수요량의 급증 및 공급유량의 부족과 같은 수요량을 전부 만족시킬 수 없는 비정상상황의 경우에는 부압(Negative Pressure)의 발생과 같은 비현실적인 결과를 도출한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 PDA 수리해석 기법이 제안되었다. 이는 기존에 고려되지 않았던 절점의 압력을 고려하여 공급 가능한 수요량을 계산하는 방법이며, 수요량의 값 또한 미지수로 설정된다. 이는 절점의 수두와 용수 공급량 관계식인 HOR (Head-Nodal Outflow Relation)을 통하여 절점별로 공급 가능한 유량이 계산된다. 공급 가능 유량을 정의하는 HOR 관계식은 총족수두 이상의 수압 조건에서는 절점의 수요유량이 모두 공급 가능하고 최소수두 이하의 수압조건에서는 해당 절점에 유량 공급이 불가능하다는 개념을 포함한다(Lee et al., 2013). 즉, 절점별 압력에 따라 수요량이 유동적으로 계산되므로 비정상상황에서도 현실적인 결과를 도출할 수 있다. HOR 관계식은 Germanopolous(1985),

Wagner et al.(1988), Fujiwara and Ganshraj(1993), Gupta and Bhav(1996), Tanyimbohand Templeman(2010) 등에 의하여 제안되었으며, Shirzad and Tabesh(2012) 및 장동일(2014)의 연구에서 실험을 통한 실측 데이터로 검증한 결과 오리피스 형태의 Wagner et al.(1998)의 연구에서 제안한 HOR식이 가장 관측 값에 근사한 것을 확인하였다.

Mays(2003)에서 제시한 상위 두 수리해석 기법의 주요 특징 및 비교는 Table 2와 같다. 정상상황의 관망에서는 두 가지 수리해석 기법 모두 신뢰도 높은 결과를 보여주지만, 비정상상황의 경우에는 PDA 수리해석 기법이 보다 현실적인 수리해석 결과를 보여주는 바, 범용성이 높은 수리해석 기법이라고 사료된다.

3. 용수 공급 성능 지표 개발

본 절에서는 퍼지함수와 PDA 수리해석 기법을 이용한 결과

를 이용하여, 관망에서의 수리학적 성능 평가 및 수요자의 사용성을 파악할 수 있는 용수 공급 성능 지표를 개발하고자 한다. 공급 성능 지표는 수리학적 해석 결과 및 절점별 기중치를 반영하여 계산된 척도로써, 전체 상수관망에서의 수리학적 공급 능력을 평가할 수 있다. 또한 유지관리 및 보수작업과 같은 의사결정 단계에서 전후의 목표 달성 정도 및 효율성 판단에도 활용될 수 있다. 본 연구에서는 비정상상황을 포함한 다양한 상황에서의 성능 평가를 위하여 범용성이 높은 PDA 수리해석 결과를 이용하였다.

기준에 사용되는 성능 지표는 전체 수요량 대비 공급 가능량의 비율로써, Fuzzy Linear Membership Function과 같은 형태를 보인다. 하지만 단순한 비율로써 나타낸 수치로써 소비자들의 사용성을 효과적으로 파악할 수 없다고 판단되어, 퍼지함수를 활용한 새로운 공급 성능 지표를 제시하고자 한다. ESRI사에서 사용 중인 퍼지 소속 함수 중, Fuzzy Large Membership Function을 활용하였다. 이는 큰 값이 1에 가까운 소속도를 갖으며, 한계효용법칙이 적용될 것으로 예상되는 변수에 적절한 변환이다(Kil et al., 2015). 본 연구에 공급 성능 지표 개발을 위해 사용되는 공급가능률은 100%에 가까울수록 좋게 평가되는 변수이며, 0%에서 10%로 증가할 때의 효용이 90%에서 100%로 증가할 때의 효용보다 큰 변수로써 해당 함수를 적용하기에 적합하다고 판단하였다. 본 연구에서 사용할 Fuzzy Large Membership Function의

식은 Eq (1)과 같으며, 여기서 f_1 은 Spread값, f_2 는 Mid-point 값으로 함수의 형태를 결정하는 변수로써 작용한다.

$$\text{Fuzzy Large Membership Function} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}} \quad (1)$$

이 중 Spread값과 Mid-point값은 변수로써 전문가, 공급자 및 사용자의 의견에 따라 수정 가능하며 할당되는 값에 따라 함수의 형태가 바뀐다. Fuzzy Large 소속 함수에 대하여 각각 다른 변수 값을 적용한 예는 Fig. 1과 같다. Spread값이 작을수록 시그모이드 함수 그래프의 분산 범위가 넓어지며 경사가 완만해진다. 이 값이 클수록 Linear 함수와 가까워지며 작을수록 Crisp 함수와 비슷한 양상을 보인다. Mid-point 값은 작을수록 그래프가 좌측으로 이동하며 Fig. 1(c)와 같은 양상을 보인다. 이는 공급가능률이 약 15% 이상일 경우 공급 성능을 100% 만족한다고 간주하는 것으로, 낙관적인 평가방법이다. 반대로 해당 값이 커질수록 그래프는 Fig. 1(d)와 같이 우측으로 이동하며, 이의 경우 공급가능률이 약 90% 이상일 경우에만 성능을 100% 만족한다고 평가하는 비관적인 측면의 평가결과를 보여준다. 이와 같이 두 변수 값을 조정함으로써 확인하고자 하는 특성의 그래프를 형성하여 성능 지표를 산정할 수 있다.

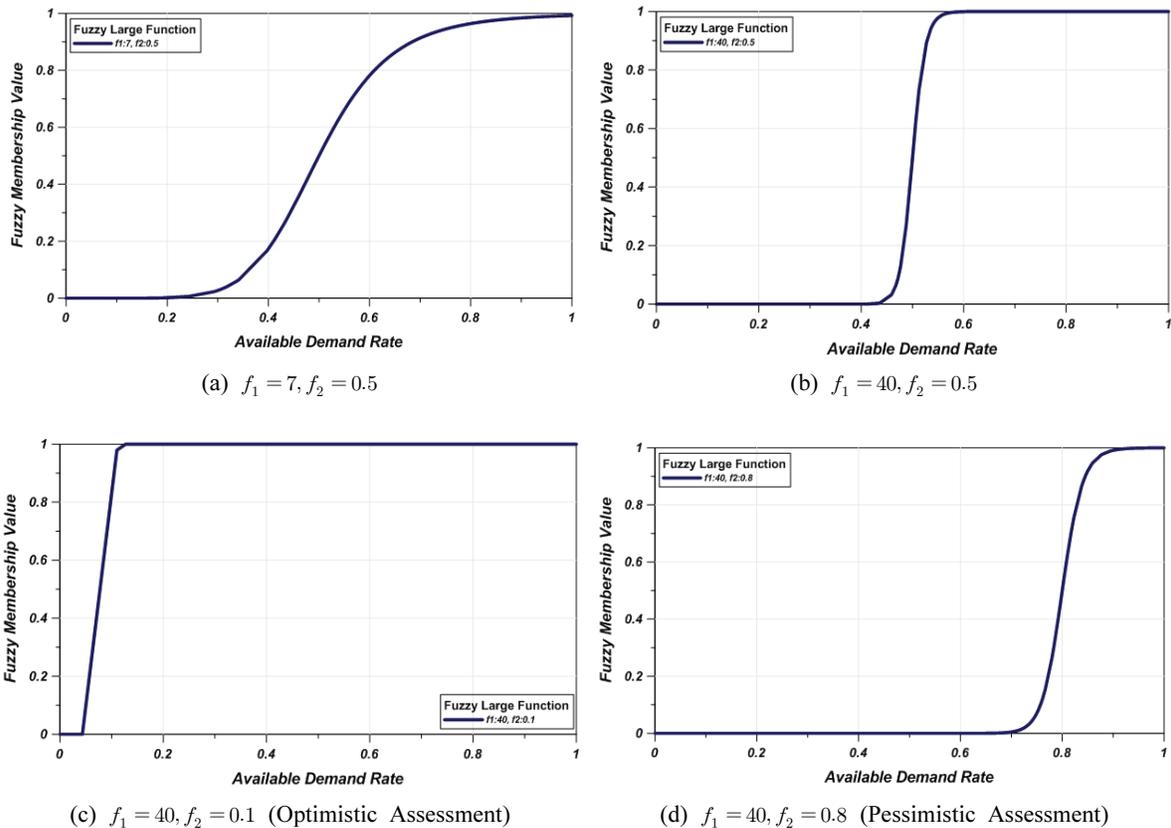


Fig. 1. Fuzzy Large Membership Function Graph by Different Variables

3.1 공급 범위 기준 지표(Possible Water Supply Range Indicator)

공급 범위 기준 지표는 절점 별 공급 성능 정도를 평가하여, 범위별 공급 성능을 파악할 수 있는 지표이다. Fuzzy Large 소속 함수를 사용하여 절점별로 공급 가능정도가 산정되며 이는 Eq. (2)와 같이 표현된다. 여기서 f_1 은 Spread값, f_2 는 Mid-point값으로 할당되는 두 변수 값에 따라 특성별 그래프를 형성할 수 있으며, 그에 따라 공급 범위 기준 지표를 산정할 수 있다.

$$Supply\ Range\ PI = \frac{1}{1 + (\frac{x}{f_2})^{-f_1}} \quad (2)$$

해당 변수의 선정에 따른 식을 통하여 나온 값은 Table 3과 같은 기준에 의하여 등급화 되며, 해당 지표는 등급에 따라 지도에 색깔별로 매핑 되어 범위별 공급 정도를 확인할 수 있다. 이를 통하여 특정 범위 별로 설계보완 및 관리가 필요한 범위 파악에 용이하다.

Table 3. Classification of Supply Range Performance Indicators

Class	Fuzzy Membership Value	Note
1	0.80 - 1.00	Well Supplied
2	0.60 - 0.80	
3	0.40 - 0.60	
4	0.20 - 0.40	Poorly Supplied
5	0.00 - 0.20	

3.2 공급 가능량 기준 지표(Possible Water Supply Indicator for the Entire System)

제한하는 공급 가능량 기준 지표는 Fuzzy Large Membership Function을 사용하여 공급가능률의 소속 정도를 정의하였으며, 개별 노드의 수요량을 고려하여 산정된 가중치를 곱하여 합산한 값과 같다. 노드별로 수요량이 상이한 바, 수요량의 충족비율이 같은 수치를 보이더라도 실제 공급 가능한 절대적인 용수량의 값이 크게 차이날 수 있기에 절점별 기본 수요량을 고려한 가중치의 반영이 필요하다. 본 연구에서 사용되는 절점 별 가중치는 전체 수요량을 합산한 양 대비 개별 절점의 수요량의 비율로써, 변수의 설정에 따라 산정된 소속 정도에 곱하여 절점별 값을 산정한다. 전체 상수관망 시스템의 공급 성능을 평가하기 위하여 모든 절점에서 계산된 값이 합산되며, 이 값은 수요자들의 사용성 평가에 따른 변수 설정을 반영하여 산정된다. 다음과 같은 공급 가능량 기준 지표 산정을 위한 식은 Eq. (3)과 같다. 여기서 f_1 은 Spread

값, f_2 는 Mid-point값이며, w_i 는 $\frac{Demand\ of\ i_{th}\ Node}{\sum Total\ Demand}$ 로써 계산

되며 절점별 가중치로 작용한다.

$$Possible\ Water\ Supply\ PI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + (\frac{x}{f_2})^{-f_1}} \times w_i \right) \quad (3)$$

이러한 식에 의해 산출된 지표는 전체 상수관망의 공급 성능을 평가할 수 있는 지표로, 평상시 혹은 비상상황에서의 상수관망의 상태 파악을 가능하게 하고, 보완 방안 및 보수정책의 의사결정의 효과 및 효율성을 판단할 수 있는 척도로서 활용가능하다.

4. 모형의 적용

4.1 대상 유역 및 입력 자료

본 연구의 대상 지역은 4개의 동과 1개의 면을 포함하는 A시의 일부 구역으로(이하 A시), 약 5,628.6 ha의 면적을 포함한다. 2017년 기준 3개의 배수지가 84,672세대에 용수를 공급하고 있으며, 각 배수구역은 Fig. 2와 같다. A시의 관망시스템은 저수지 3개, 절점 1,492개, 펌프 8개 그리고 8개의 밸브로 구성되어 있다. 각 배수지는 본래 개별 구역에 용수를 공급하는 시스템이나, 특정 배수지에서 문제가 발생하여 용수 공급에 차질이 생길 경우 인접 배수지와 비상 연계하여 공급 받도록 한다. 인접 배수지와와의 연계는 기존에 설치되어 있는 비상관을 통하여 실시되며, 비상 연계 시에만 열어 용수 공급을 할 수 있도록 한다. 비상관로는 총 10개이며, 배수지 1지-2지를 잇는 비상관 9개와 2지-3지를 잇는 비상관 1개가 존재한다.

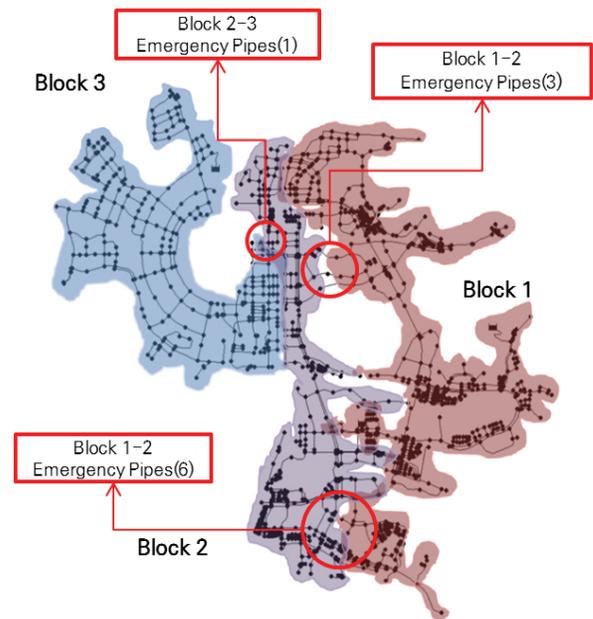


Fig. 2. Layout of WDS of 'A' City

4.2 용수 공급 성능 지표 산정

본 연구에서는 A시의 관망에서 배수지 1지의 문제발생 시를 가정하여, 2지와 3지로부터 비상급수를 받는 시나리오에 대하여 수리해석을 하였다. 수리해석 기법은 비정상상황에도 적용 가능한 PDA 기법을 사용하였으며, 상수도시설기준(Korea Water and Wastewater Works Association, 2010)의 배수관 내 최소동수압 규정 값인 150 kPa (15.4 m)를 고려하여 총족수두는 15 m로, 최소수두는 각 절점의 고도 값으로 설정하였다.

용수 공급 성능 지표 산정을 위하여, PDA 수리해석을 통하여 산정된 절점별 공급가능률에 Fuzzy Large Membership Function을 적용하였다. f_1 (spread)값이 크고 f_2 (mid-point)값이 작을수록 낙관적인 평가를 반영하며, f_1 (spread)값이 크고 f_2 (mid-point)값이 클수록 비관적인 평가를 반영한다. 이와 같은 다양한 변수 선택에 따라 의사결정자의 주관 및 평가 척도가 반영되며, 단순히 공급가능 비율로 산정되는 지표에 비하여 용수의 사용성을 보다 정확히 반영할 수 있다. 수리해석 결과를 활용하여 Table 4에 제시한 변수 조합을 적용한 퍼지함수의 그래프는 Fig. 3과 같다. 변수의 조합에 따라 낙관도 및 분산 정도를 조정할 수 있어, 확인하고자 하는 특성의 값을 산정할 수 있다. 해당 예시에서 1번 변수 조합에 의한 결과는 가장 낙관적이며, 5번 변수 조합에 의한 결과는 가장 비관적인 결과를 도출한다. 해당 그래프 및 결과 값은 개별 절점을 평가할 수 있는 공급 범위 기준 지표 및 전체 관망 시스템을 평가할 수 있는 공급 가능량 기준 지표 산정에 활용될 수 있다.

4.2.1 공급 범위 기준 지표

A시의 관망 시스템에서 상위에서 제시한 1지 배수지의 문제 발생 상황에 대하여, 상위에 제시한 퍼지함수 소속도 값을 이용한 절점별 수치를 지도상에 도시한 결과는 Fig. 4와 같다. 이는 Table 3에 제시한 기준에 따라 5단계로 등급화한 결과 값으로 Fig. 3에서 적용한 변수 값을 대입하여 지도상에 표기한 결과로, 절점별 혹은 해당 구역별 공급 성능 정도 파악에 용이하다. 기존의 일반적인 지표에 적용되었던 Linear 함수에 따른 단순 비율에 대하여 나타낸 Fig. 4(a)에 비하여, 퍼지 함수를 적용한 공급 범위를 나타낸 Figs. 4(b)~(f)는 변수 설정에 따라 상이한 결과를 보인다.

공급가능 비율이 현저히 높은 경우나 낮은 경우 수요자들이 체감하는 사용성은 퍼지 함수의 적용에 따라 크게 영향 받지 않지만, 중간 범위의 경우에는 함수의 적용에 따라 변화하는 양상을 보인다. 즉, Fig. 4의 경우 문제발생 배수지인 1지의 공급범위 중 말단 부분은 Figs. 4(a)~(f)에서모두 같은 등급의 결과를 보이며, 문제발생 배수지와 가장 먼 3지의 공급범위의 경우 또한 함수 적용에 따라 크게 변함없는 결과를 보여준다. 하지만 문제발생 배수구역인 1지와 연계 배수구역인 2지의 혼합구역 경우, 타 배수지로부터 일부 용수를 공급받는다. 해당 구역의 경우는 함수의 적용에 따라 사용성 평가가 다르게 나타나는데, 낙관적인 변수조합인 Fig. 4(b)의 경우 Table 3의 분류에 따라 1등급(Well Supplied)에 속하지만 Fig. 4(f)의 경우에는 5등급(Poorly Supplied)에 속하는 현상을 보인다. 이는 퍼지함수의 설정에 따라 수요자가 느끼는 용수의 사용성을 평가하는 다양한 관점을 보여주

Table 4. Available Discharge PI Values

Combination	f_1 (Spread)	f_2 (Mid-Point)	Note
Large1	40	0.1	Most Optimistic
Large2	5	0.3	
Large3	7	0.5	
Large4	20	0.7	
Large5	40	0.9	Most Pessimistic

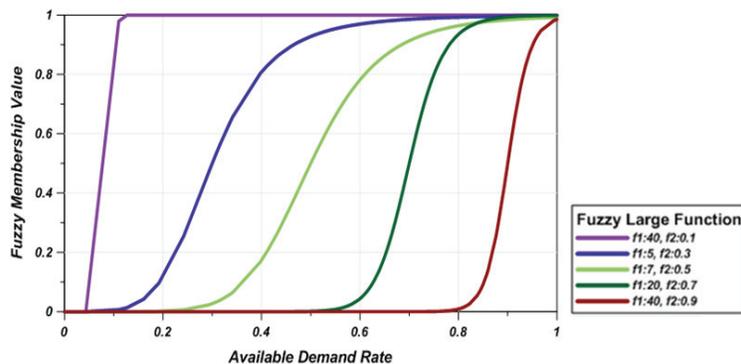


Fig 3. Fuzzy Membership Function Graph by Different Variables

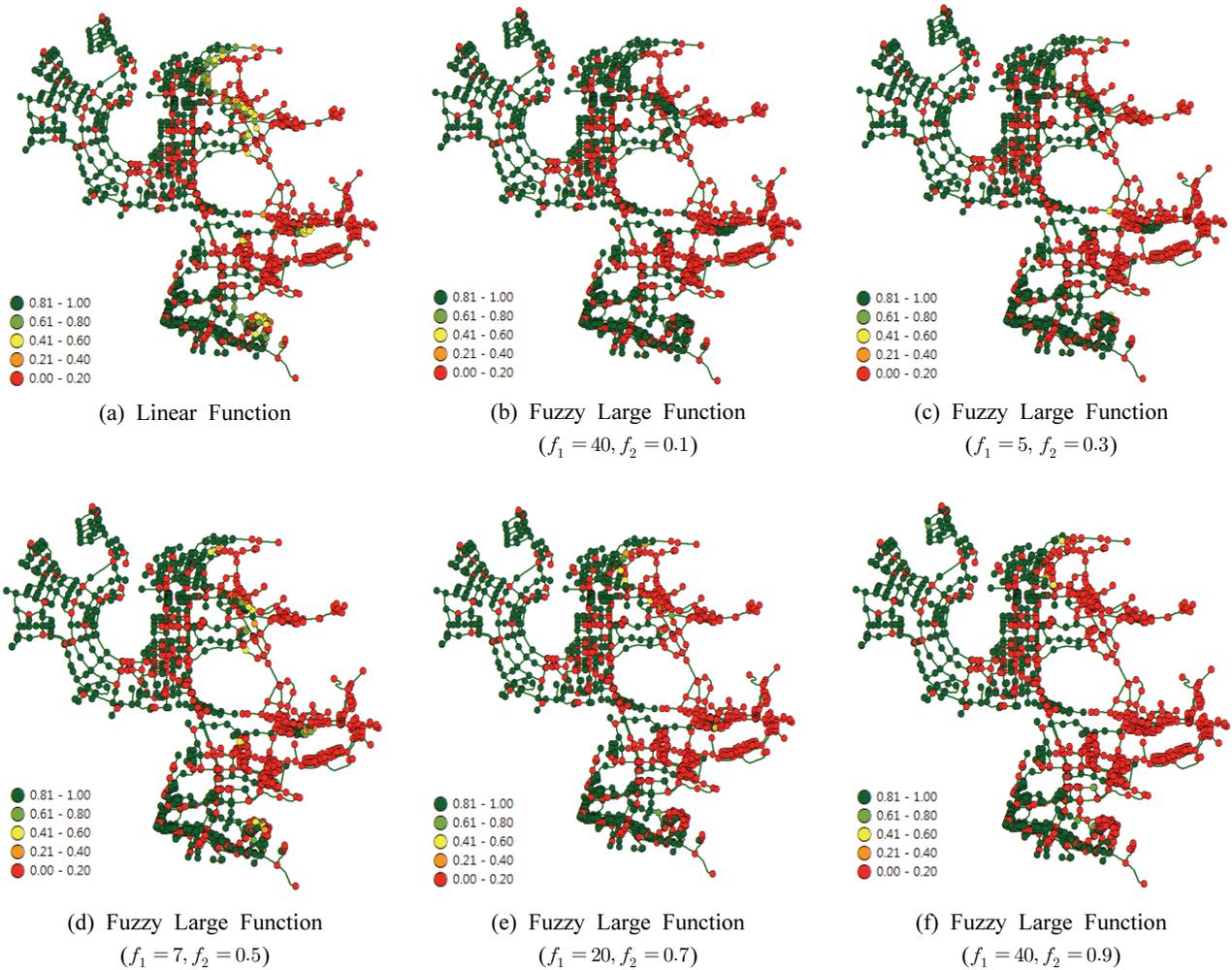


Fig. 4. Nodes Colored Based on Their Association to Five PI Classes

는 예로, 기존의 수학적 지표(Fig. 4(a))로는 반영에 한계가 있던 부분이다. 이를 통하여 각종 비상상황에 대한 모의 시, 우선적으로 보수 및 개량이 필요한 구역 파악에 용이하며 필요수량에 대비 공급 가능한 비율의 변화에 대하여 수요자들의 평가를 반영한 구역별 용수 사용성의 저하정도를 평가할 수 있을 것이다.

4.2.2 공급 가능량 기준 지표

PDA 수리해석 프로그램을 통하여 A시의 상수관망에서의 배수지 1지에 문제가 발생한 상황을 모의한 결과를 이용하여 제안한 공급가능량 기준 지표를 계산한 값은 Table 5와 같다. 이는 전체 1,492개의 절점 데이터 중, 일부데이터만을 기재한 것으로, Available Demand(공급가능량)은 PDA 수리해석을 통하여 계산된 압력을 고려한 실제 공급 가능한 양을 의미하며, Available Rate(공급가능률)은 절점별 요구수요량 대비 공급 가능한 수요량의 비율을 나타낸 것과 같다. 해당 값은 약 1,500개 절점 중 일부 절점에 대한 데이터 값이며, 퍼지 소속 함수 산정을 위한 변수로는 $f_1 = 7, f_2 = 0.5$

를 사용하였다. Table 5에서 마지막 열($\mu(x) \times w_i$)의 값의 총합이 본 연구에서 제안하는 공급가능량 기준 지표이며, 본 경우에서의 공급 가능량 기준 지표의 값은 0.7324로 계산된다.

해당 지표는 퍼지 소속 함수의 변수 설정에 따라 낙관도 및 분산 정도를 조정할 수 있어, 수요자의 평가정도를 반영한 값을 산정할 수 있다. Table 6은 변수 설정에 따른 공급가능량 기준 지표 값의 변화를 보여준다. 해당 시나리오에 대한 공급가능량 지표 값은 0.6578에서 0.7929 사이의 값을 갖으며, 기존 단순 비율로만 산정된 Linear함수에 의해 산정된 값에 비하여 수요자의 성향 및 상황에 따른 사용성 평가에 따른 적용이 가능하다. 1번과 5번 변수 조합은 각각 가장 낙관적/비관적인 평가 결과를 도출하며, 그 예로 만족도가 0.5 이상인 절점의 개수는 1번 조합의 경우에는 725개, 5번 조합의 경우에는 569개로 차이를 보인다. 이와 같은 지표는 관망 전체 시스템의 평가를 가능하게 하여, 비상상황시의 수요자입장에서의 용수 사용성 저하정도 및 관망개선 모의 시 개선 정도를 파악할 수 있어 의사결정에도 용이하게 이용가능하다.

Table 5. Calculated Performance Indicator of A City's WDS (Case: Res 1 break, f1=7, f2=0.5)

Node	Demand (CMD)	Available Discharge (CMD)	Available Rate (%)	Weighting Factor (w_i)	Fuzzy Membership Value ($\mu(x)$)	$\mu(x) \times w_i$
3002	533.28	0.00	0.00	0.003235	0.00	0.00
2960	961.84	107.86	0.11	0.005835	2.85E-05	1.67E-07
2261	1.51	0.34	0.23	9.16E-06	0.003742	3.43E-08
1406	6.05	3	0.50	0.00004	0.485481	1.78E-05
3229	416.72	117.47	0.28	0.002528	0.017783	4.5E-05
...
1136	499.75	499.75	100	0.003032	0.992248	0.003008
7177	885.29	885.29	100	0.00537	0.992248	0.005329
Total	164,841	124,368.76	73.6	1.00		0.7324

Table 6. Available Discharge PI Value

	f_1 (Spread)	f_2 (Mid-Point)	Possible Water Supply PI
Linear	-	-	0.7363
Large1	40	0.1	0.7928
Large2	5	0.3	0.7670
Large3	7	0.5	0.7324
Large4	20	0.7	0.7129
Large5	40	0.9	0.6578

5. 결 론

본 연구에서는 비정상상황을 포함한 다양한 상황에서의 관망의 수리학적 공급 성능을 평가할 수 있는 용수 공급 성능 지표를 제안하였다. 이는 기존의 상수관망의 평가 지표들이 단순한 공급가능비율로써 정의되어, 실제 용수의 사용성을 반영하지 못한다는 문제점을 파악하여 퍼지개념을 추가한 용수의 사용성 평가가 가능한 지표들을 제안하였다. 다양한 상황에 대한 성능 평가를 위하여 비정상상황에서의 수리해석이 가능한 PDA 기법을 활용해 절점별로 공급 가능한 유량을 계산하였고, 수리해석 결과를 퍼지 함수에 적용하여 용수 공급 성능 지표를 제안하였다. 이는 개별 절점의 평가가 가능한 공급 범위 기준 지표(PWSRI)와 전체 관망의 평가가 가능한 공급 가능량 기준 지표(PWSIES)로써, 평가자의 주관에 따라 낙관도 및 함수의 분산정도를 반영할 수 있다. 제안된 공급 성능 지표들의 적용성 검증을 위하여, A시의 배수지 문제발생 시나리오 모의 결과를 통해 기존에 제안된 지표와의 비교 및 변수 설정에 따른 결과를 비교하였다.

제안된 용수 공급 성능 지표를 통하여 수리학적 해석 결과를 반영한 관망의 공급 성능을 평가할 수 있었으며, PDA 수리해석 모형을 활용하여 비정상상황의 관망에도 적용할 수 있었다. 공급 가능량 기준 지표를 통하여 절점별

수요량을 고려한 전체 관망의 공급 성능을 평가할 수 있었으며, 공급 범위 기준 지표를 활용하여 개별 절점에 대한 공급 성능 정도를 평가할 수 있었다. 이는 다양한 비정상상황에서의 공급 성능 진단 및 상황파악을 가능하게 하여, 관망의 개량 혹은 저감대책의 필요성을 확인할 수 있도록 한다. 또한 저감대책 적용 시의 효과를 정량화 할 수 있어, 저감대책 수립을 위한 의사결정에도 이바지할 수 있을 것으로 기대한다. 향후 연구에서는 실제 비상시 상황 자료를 확보하여, 퍼지함수 및 PDA 수리해석이 갖고 있는 불확실성에 대한 평가를 추가하여 보다 정확도 높은 모델이 될 수 있도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업 (2016002120003)”으로 지원받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

References

Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., and Parena, R. (2006) *Performance Indicators for Water Supply Services*. 2nd Edition, IWA publishing.

- Ang, W.K., and Jowitt, P.W. (2006) Solution for Water Distribution Systems Under Pressure-deficient Conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 132, No. 3, pp. 175-182.
- Bhave, P.R. (1991) *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*. Technomic Publishing.
- Fujiwara, O., and Ganesharajah, T. (1993) Reliability Assessment of Water Supply Systems with Storage and Distribution Networks. *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2917-2924.
- Germanopoulos, G. (1985) A Technical Note on the Inclusion of Pressure Dependent Demand and Leakage Terms in Water Supply Network Models. *Civil Engineering Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 171-179.
- Jang, D., and Kang, K. (2014) Experimental Analysis of Nodal Head-outflow Relationship Using a Model Water Supply Network for Pressure Driven Analysis of Water Distribution System. *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 36, No. 6, pp. 421-428.
- Japan Water Research Center(JWRC) (1998) *Evaluation Manual of Water Supply System*. Japan (導・送・配水システム評価マニュアル).
- Jun, H.D. (2005) Isolating Subsystems by Valves in a Water Distribution System and Evaluating the System Performance. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 7, pp. 585-592.
- Kil, H.M., Park, H.S., and Kim, K.S. (2015) Analysis of Care Hospital Location Factors by using Fuzzy Sets and AHP: Focusing on the Seoul Metropolitan Area. *Journal of the Residential Environment Institute of Korea*, Vol. 13, No. 2, pp. 119-134.
- Korea Water and Wastewater Works Association (2010) *Water Supply Facilities Criteria*.
- Lee, H.M., Yoo, D.G., Kim, D.Y., and Kim, J.H. (2013) Development and Application of Pressure Driven Analysis Model based on EPANET. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 121-129.
- Marques, R.C., and Monteiro, A.J. (2001) Application of Performance Indicators in Water Utilities Management: A Case Study in Portugal. *Water Science and Technology*, Vol. 44, No. 2-3, pp. 95-102.
- Mays, L.W. (2003) *Water Supply System Security*. McGraw-Hill.
- Ministry of Environment Korea (2015) *Statistics of Water Supply and Sewage System*.
- Raines, G.L., Sawatzky, D.L., and Bonham- Carter, G.F. (2010) *Incorporating Expert Knowledge: New Fuzzy Logic Tools in ArcGIS 10*. ArcUser Spring 2010.
- Rossman, L.A. (2000) *EPANET 2: Users Manual*. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Shirzad, A., & Tabesh, M. (2012) Study of Pressure-Discharge Relations in Water Distribution Networks Using Field Measurements. *Proceedings of the IWA World Water Congress & Exhibition*, Busan, Korea.
- Tanyimboh, T.T., and Templemen, A.B. (2010) Seamless Pressure-deficient Water Distribution System Model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, Vol. 163, No. 8, pp. 389-396.
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1988) Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, No. 3, pp. 276-294.
- Wood, D.J. (1980) *Computer Analysis of Flow in Pipe Networks Including Extended Period Simulations: User's Manual*. Office of Continuing Education and Extension of the College of Engineering of the University of Kentucky.

Received	January 4, 2018
Revised	January 5, 2018
Accepted	January 9, 2018

