



An application of the A-PDA model and the water supply performance index for the temporal and spatial evaluation of the performance of emergency water supply plans via interconnections

Oak, SueYeun^a · Kim, SuRi^a · Jun, Hwandon^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 18-078

Received: 28 August 2018; Revised: 11 September 2018; Accepted: 11 September 2018

Abstract

The purpose of the water distribution system is gradually changing to increase the flexibility for responding to various abnormal situations. In addition, it is essential to improve resilience through preparing emergency plans against water supply failure. The most efficient way is emergency interconnections which supply water from interconnected adjacent blocks. To operate successful interconnections, it is essential to evaluate the supply performance in spatial and temporal aspects. The spatial and temporal aspects are dominated by its interconnected pipes and interconnected reservoirs respectively. In this study, an emergency interconnection scenario where problem occurred in reservoir 1 at 0:00hr in A city, Korea. An Advanced-Pressure Driven Analysis model was used to simulate the volume and inflow volume of the interconnected reservoirs. Based on the hydraulic analysis results, a multi-dimensional evaluation of the supply performance was conducted by applying possible water supply range indicator (PWSRI) and possible water supply temporal indicator (PWSTI) which are based on fuzzy membership functions. As a result, it was possible to evaluate the supply performance on the sides of consumers in spatio-temporal aspects and to review whether established plans mitigate the damage as intended. It is expected to be used for decision making on structural and non-structural emergency plan to improve the performance of an emergency interconnection.

Keywords: Water distribution system, Hydraulic analysis, Advanced-pressure driven analysis, Performance indicator, Spatio-temporal analysis

비상시 용수 연계공급 성능의 사-공간적 평가를 위한 A-PDA 모형 및 공급성능지표의 적용

옥수연^a · 김수리^a · 전환돈^{a*}

^a서울과학기술대학교 공과대학 건설시스템공학과

요 지

상수관망시스템의 운영목적은 탄력성을 높여 각종 비정상상황에 유연하게 대처할 수 있는 방향으로 점차 변화하고 있으며 이에 따라 비정상상황에 따른 단수구역 발생에 대한 사후대책 대비를 통한 탄력성 향상이 필수적이다. 이를 위한 가장 효율적인 방법은 수계전환에 따른 비상공급 수원 확보이며, 비상관로를 통하여 인접 배수블록으로부터 단수된 구역에 용수를 공급할 수 있다. 성공적인 비상연계 운영을 위해서는, 수리학적 해석을 통하여 시공간적인 측면에서의 공급성능을 평가해야 한다. 비상연계 시, 공간적인 범위를 결정하는 주요 요소는 관경, 위치 및 관저고와 같은 비상관로에 해당하는 제원이며, 시간적인 범위를 결정하는 주요 요소는 연계배수지의 용량과 정수장에 공급 가능한 추가수량이다. 본 연구에서는 A시의 상수관망에 대하여 배수지 1지에 문제가 발생하여 타 배수지들로부터 비상연계를 받는 시나리오에 대하여 모의를 진행하였다. 배수지의 저류량 및 유입량에 대한 모의를 위하여 Advanced-Pressure Driven Analysis 모형을 사용하였으며, 수리해석 결과를 바탕으로 공급범위기준지표 및 공급시간기준지표를 산정하여 연계공급성능에 대한 다각도적인 평가를 진행하였다. 이에 비상연계에 대하여 소비자들이 실제 체감하는 공급성능을 시공간적인 측면에서 파악할 수 있었으며, 설계제원의 타당성에 대한 검토가 가능하였다. 이는 비상연계 성능향상을 위한 구조적 대책 및 비구조적 대책 수립에 대한 의사결정에 용이하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어: 상수도 관망, 수리해석, Advanced-Pressure Driven Analysis, 성능지표, 시공간적평가

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-6570
E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr (H. Jun)

1. 서론

상수관망 시스템은 수요자들에게 질적으로 안전하고 양적으로 충분한 물을 적절한 수압으로 공급하는 데에 그 목적을 두고 있다. 환경부에서 발간한 2016년 상수도 통계자료에 따르면 전국 상수도 급수인구는 52,259천명을 넘어섰으며, 그 보급률은 98.9%로 매년 증가하는 수치를 보인다. 하지만 상수관망 시스템은 시간 경과 및 각종 외부 자극들로 인하여 노후화되어가고 있으며 관로 손괴 사고, 각종 설비 고장, 자연재해 및 화재발생으로 인한 수요량의 증가와 같은 예기치 못한 내/외적인 요인들로부터 기인하는 각종 사고로부터 자유롭지 못하다. 이에 따라 대규모 단수 피해 발생 가능성이 높아지고 있으며, 이는 상수도 공급의 질과 신뢰성을 떨어뜨리는 주요원인이 된다.

지금까지의 상수관망 시스템 운용이 보급률 및 급수인구의 증가에 초점을 맞춰왔다면, 점차 그 목표는 운영의 탄력성을 높여 각종 비정상상황에 유연하게 대처할 수 있는 방향으로 이동하고 있다. 상수관망에서의 탄력성은 각종 사고로 인한 관망의 비정상적인 운영 상황에서 피해 시간 혹은 피해 정도를 최소화하는 것으로 정의될 수 있다. 이와 같은 상수관망의 탄력성을 향상시키기 위해서는 각종 비정상상황에 대응할 수 있는 사후대책 대비가 필수적이며, 이를 위한 가장 효율적인 방법은 수계전환에 따른 비상공급 수원을 확보하는 것이다. 수계전환을 통한 비상연계는 상수관망 시스템의 운영중단과 같이 용수를 공급할 수 없는 상황에서, 인접한 배수블록으로부터 비상관로를 통하여 수계를 전환함으로써 단수된 구역에 용수 공급을 시행하는 것을 의미한다. 수계전환을 통한 비상시 물 공급에 대한 필요성은 다수 언급된 바 있다. 상수도 시설기준(Ministry of Environment Korea, 2010) 7장에서는 배수시설에 대하여 인접된 수도사업자의 배수본관이나 송수관과 상호 연결하여 비상시에 상호 융통하는 것을 권장하고 있으며, 수도법 제 4조에 따른 수도정비기본계획의 수립에도 연계 운영의 필요성이 명시되어 있다(Oak et al., 2018a). 또한 EPA에서 발간한 Planning for an Emergency Drinking Water Supply (2011)에서도 비상시에 수원을 공유하여 연계공급을 함으로써 피해를 최소화하는 방안에 대하여 기술하고 있다. 이와 같은 수계전환은 지자체간, 지자체 내의 배수블록 간, 동일 배수블록 내에서의 추가 공급노선 확보 등과 같이 다양한 형태로 운영되며, 해당 시스템을 간략히 도식화하면 Fig. 1과 같다. 실제로 수계전환을 통한 비상연계는 국내의 상수관망 운영에도 활발히 이루어지고 있으며, New Jersey, Rhode Island 등과 같은 국외 다수의 도시에서도 비상 연계 운영을 위한 보고서들이 작성되었다.

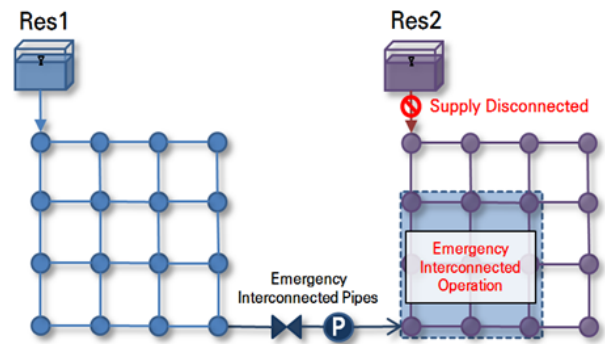


Fig. 1. An emergency interconnected operation (Oak et al., 2018a)

성공적인 비상연계 운영을 위해서는 수리학적 해석을 통한 공급능력 평가와 상수관망의 설계 보안을 통한 공급능력 향상이 필수적이다. 비상연계 운영능력 평가를 위해서는 두 가지 관점에서의 접근이 필요하다. 제안하는 두 가지 인자는 공간적인 측면에서의 평가와 시간적인 측면에서의 평가이다. 수리학적 해석을 통하여 연계 가능한 범위와 시간을 모의하여 얼마나 많은 절점에, 얼마나 긴 시간동안 연계 운영이 가능한지에 대하여 평가함으로써 목표하는 연계성능을 달성하는 지에 대한 평가가 가능하다. 상수관망 시스템에서 두 평가 인자는 설계된 구성요소에 영향을 받는다. 먼저 공간적인 범위를 결정하는 요소는 비상관이다. 연계공급을 위한 비상관로의 위치, 관경 및 관저고 등의 속성에 따라 연계공급 가능한 범위가 결정된다. 두 번째로 시간적인 범위를 결정하는 요소는 연계해주는 배수지의 용량과 정수장에서 연계공급 가능한 추가수량이다. 해당 수원이 가지는 용량에 따른 여유 저류량에 따라, 연계 공급 가능한 시간이 결정된다. 현재 상수도시설 기준(Ministry of Environment Korea, 2010)에 따르면 배수지의 용량에 관하여 시간변동조정용량, 비상시대처용량, 소화용수량 등을 고려하여 계획 1일최대급수량의 12시간분 이상을 표준으로 할 것을 명시하였으며, 추가적으로 비상시에도 수요자에게 복구시간에도 단수없이 급수할 수 있도록 배수지 용량을 설정할 것을 권고하고 있다. 또한 비상관로에 대해서는 서로 다른 정수장계통 및 배수계통에 대하여 상호 지원 체제를 강화하기 위하여 연결관이 설치되는 것이 바람직하다고 명시하고 있다. 하지만 배수관 및 비상관로 설치에는 대략적인 설계기준과 비상시의 대처를 고려한 설계의 필요성에 대해서만 명시되어 있어, 비상연계를 고려하여 설계된 구조물들이 실제 연계 운영 시에 실제 의도하는 바와 같이 작용하는 지에 대한 검토는 미흡한 실정이다. 이에 수리학적 해석을 통하여, 설계된 배수용량과 비상관로에 대한 공급능력 평가와 더불어 비상시 공급능력 향상을 위한 설계보완이 이루어져야 한다.

수계전환을 통한 비상 연계 모의를 위해서는 제한된 용수 공급 상황에서의 수리해석이 요구된다. 하지만 보편적으로 사용되는 수리해석 기법들로는 해당 상황을 모의하는데 있어 신뢰도 높은 결과를 기대하기 어렵다. Demand Driven Analysis (DDA) 기법은 정상상황의 관망해석에는 높은 신뢰도를 보이나, 주어진 수요량을 완벽히 만족시킨다는 가정과 수원에서의 공급량이 무한하다는 무한수원의 가정을 포함하고 있다. 본 연구에서 수행하는 비상시 수계전환에 따른 공급성능 평가를 위해서는 공급가능한 수량 및 압력 변화에 따른 실제 공급가능량 산출이 필수적이다. 하지만 해당 기법을 통한 모의는, 모든 절점에서의 수요량을 100% 만족시키는 결과를 도출하며 그 과정에서 부압(Negative Pressure)와 같은 비현실적인 결과를 도출할 수 있기에 본 연구에의 적용은 적합하지 않다. Pressure Driven Analysis (PDA)는 절점의 압력과 공급 가능유량 간의 상관관계를 고려하여 공급 가능한 유량을 계산하는 기법으로, 압력관련 비정상상황에 대한 모의가 가능하다. 이를 통하여 수계전환을 통한 비상연계 수리해석 시, 연계 가능한 공급 범위 및 공급 성능 정도를 파악할 수 있다. 하지만 해당 수리해석 기법 또한 마찬가지로 무한수원의 가정을 포함하고 있어, 비상연계로 인한 배수지의 저류량 변화 및 수위변동에 대한 모의에 한계가 있다. 따라서 시간적인 측면을 평가하고자 하는데 있어, 비현실적인 결과를 도출할 우려가 있다.

이에 유한수원을 고려할 수 있는 수리모델인 Advanced Pressure Driven Analysis (A-PDA) 모델을 적용하고자 한다. 이는 Lee et al. (2018)에 의하여 제안되었으며, 제한된 저류량 및 유입량을 고려할 수 있어, 연계 공급을 위한 배수지의 여유 저류량에 대한 모의 및 평가가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 A-PDA 수리해석 기법을 적용하여 A시의 수원(배수지) 문제 발생에 따른 연계공급을 모의하고자 하며, Oak et al. (2018b)에서 제안한 용수공급 성능지표를 바탕으로 하여 시공간적인 측면에서의 연계능력을 평가하고자 한다.

2. 관망의 수리해석 기법

상수관망의 수리해석에서 보편적으로 사용되는 해석 기법은 두 가지가 있다. 하나는 수요량을 기반으로 하는 Demand Driven Analysis (DDA)이며, 다른 하나는 압력값을 기반으로 하는 Pressure Driven Analysis (PDA)이다. DDA는 개별 절점에서 할당된 수요량을 100% 만족시킬 수 있음을 전제로 한다. 이는 특별한 문제가 발생하지 않은 정상상황의 상수관망 시스템의 수리해석에는 높은 신뢰도를 보이나, 절점에서의 수압

혹은 공급유량이 부족한 비정상상황에서도 주어진 수요량을 100% 만족시키기 위하여 비현실적인 결과를 도출한다. 이에 PDA 수리해석 기법이 제안되었다. 이는 절점의 압력과 공급 가능유량 간의 상관관계를 고려하여 실제 절점별로 공급 가능한 유량을 계산하는 수리해석 기법으로, 수요량을 고정인자로 하는 DDA 기법과는 달리 수요량 또한 변수로 취급하여 HOR (Head-Nodal Outflow Relation) 관계식을 이용해 그 값을 산출한다. 해당 수리해석 기법은 DDA 기법에 비하여 각종 압력관련 비정상상황에 대한 적용성이 뛰어나며, 보다 현실적인 결과에 유사한 결과를 도출한다. 하지만 상기한 두 수리해석 기법들은 모두 수원에 대하여 공급량이 무한하다는 가정을 포함하고 있다. 해당 가정 하에 수원은 특정 수위를 갖는 무한한 규모로 간주되며, 이에 따라 수원에서 무한정으로 유량이 공급될 수 있다. 이러한 가정은 정상상황의 상수관망 시스템에서는 비교적 타당하다고 할 수 있으나, 수요유량의 급증 혹은 수계전환을 통한 비상급수와 같이 배수지에서의 저류량의 규모 및 정수장으로부터 공급 가능한 추가 공급량을 고려해야 할 경우에는 현실적인 모의가 불가능하다. 즉, 실제 수원에서의 저류량이 부족하여 공급이 미흡하거나 불가능한 상황에서도 수리학적인 조건을 충족하는 범위 내에서 수요절점에 대해 무한한 공급능력을 보여준다. 이와 같은 수원에서의 저류량 관련 비정상상황을 모의할 수 있는 수리해석 모형인 Advanced Pressure Driven Analysis (A-PDA)가 Lee et al. (2018)에 의하여 제안되었다. 이는 기존의 수리해석 모형과는 달리 유한수원의 가정을 포함하였으며, 수원의 저류량을 고려하기 위하여 수원에서의 수위 및 유입유량을 추가적으로 고려하였다. 상위에 제시된 세 가지 수리해석 기법의 주요 특징은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics comparison among hydraulic analysis models

	DDA	PDA	A-PDA
Consideration for Available Discharge	Nodal Demand	Nodal Pressure	Nodal Pressure and Residual Storage
Applicability for Abnormal Situation	X	O	O
Consideration for Source Storage	X	X	O
Applicability for Storage Deficient Condition	X	X	O
Additional Inputs	-	HOR	HOR, Level-Storage Relation, Average Inflow&pattern

2.1 Demand Driven Analysis (DDA)

DDA 수리해석 기법은 모든 절점에서의 수요량을 고정인 자로 간주하는 수리해석 기법으로, 어떠한 상황에서도 주어진 수요량을 완벽히 충족함을 전제로 하여 연속방정식과 순환방정식으로 절점별 압력을 계산한다. 해당 수리해석 기법은 EPANET과 KYPPIE 등의 주요 수리해석 프로그램에 다수 채택되었으며, 일반적인 수리해석 기법에 사용된다. 이는 정상 상황의 상수관망 시스템의 수리해석에는 높은 신뢰도를 보이나, 관로 파괴로 인한 누수, 소방용수의 사용으로 인한 수요증가, 손실수두의 증가 및 가압장의 문제발생 등과 같은 비정상 상황의 수리해석에는 낮은 신뢰도를 보인다. 즉, 수요량의 급증이나 공급유량의 부족 혹은 압력저하와 같이 수요량을 완벽히 충족시킬 수 없는 상황에서도, 모든 절점에서의 수요량을 100% 만족을 전제로 하여 압력 값을 계산하는 과정에서 부압 (Negative Pressure)과 같은 비현실적인 결과를 도출한다.

2.2 Pressure Driven Analysis (PDA)

해당 수리해석 기법은 기존의 DDA 해석 기법에서 고려되지 않았던 절점의 압력과 공급가능유량 간의 상관관계를 고려할 수 있는 HOR (Head-Nodal Outflow Relation) 식을 도입하였다. 해당 식을 통하여 압력을 고려한 공급가능 수요량이 계산되며 DDA 수리해석에 비하여 보다 현실적인 수리학적 거동을 반영한 결과를 도출한다. HOR 관계식은 지정된 충족수두 이상의 수압을 가지는 절점에 대해서는 주어진 수요유량이 완벽히 공급 가능하나 최소수두 이하의 조건에서는 공급이 불가능하다는 개념을 포함하며, 사이 범위의 압력을 가지는 절점에 대해서는 절점의 압력 값에 따른 공급가능유량 값이 도출된다. 해당 관계식은 Germanopolous (1985), Wagner *et al.* (1988), Fujiwara and Ganshraj (1993), Gupta and Bhave (1996), Tanyimbohand Templeman (2010) 등, 다수의 연구에 의하여 다양한 형태의 식들이 제안되었으며, 해당 식들의 검증에 대한 다양한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

Jang and Kang (2014)의 연구에서는 실험을 통한 실측 데이터 값과 HOR 식을 통한 값을 비교하였으며, Wagner *et al.* (1998)이 제안한 오리피스 형태의 식이 실험값과 가장 유사한 결과를 보임을 확인하였다.

2.3 Advanced Pressure Driven Analysis (A-PDA)

A-PDA 수리해석 기법은 기존의 PDA 기법을 기반으로 유한수원의 개념을 도입하여 Lee *et al.* (2018)에 의하여 제안된 수리해석 기법이다. 해당 수리해석 기법은 EPANET2.0의 수리해석 알고리즘을 기반으로 개발된 Lee *et al.* (2013, 2016)의 Global Gradient Algorithm기반의 PDA 모형인 SB-PDA의 엔진을 바탕으로 개발되었다. 해당 프로그램에는 기존의 수리해석에서의 수원인 Reservoir에, Limited Reservoir라는 유한수원 객체를 추가하였다. 해당 객체에는 기존 수리해석 기법에서는 고려되지 않았던 수원의 용량 및 저류량을 고려하기 위하여 수원의 수위-저류량 관계식을 도입하였으며, 수원으로 유입되는 유량과 시간대별 변화량을 고려하기 위하여 유입량 및 유입패턴 변수를 추가하였다. 이에 따라 수원에서의 시간에 따른 잔여 저류량, 유입량을 고려할 수 있으며, 수원의 고갈 여부 및 고갈시간에 대한 모의가 가능하다. 해당 수리해석 모형에서 새롭게 추가된 수원의 형태인 Limited Reservoir가 기존의 수리해석 모형에서 존재하는 수원의 형태인 Reservoir 및 탱크에 비하여 갖는 차이점 및 특징은 Table 2와 같다. 가장 대표적인 차이점은 저류량의 용량 및 수위를 고려할 수 있다는 점이다. 기존 수리해석 모형에서의 Reservoir는 어떠한 조건에서도 초기 수위를 유지한다. 하지만 Limited Reservoir는 유입량이 유출량보다 큰 경우에는 수위가 상승하고, 유입량이 유출량보다 작을 경우에는 수위가 하락하는 경우에 대한 모의가 가능하다. 무엇보다도, 유출량이 유입량에 비하여 현저히 많을 경우에, 수원이 고갈되어 전체 시스템에 공급을 해 줄 수 없는 양상까지 모의가 가능하다는 특징이 있다.

Table 2. Characteristics comparison among source types

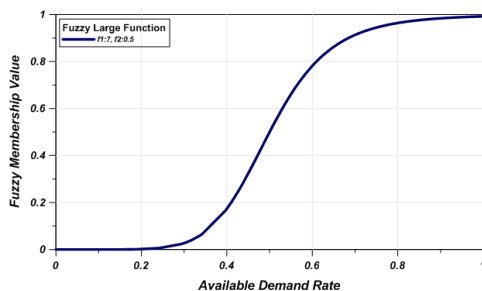
	Tank	Reservoir	Limited Reservoir
Capacity	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum Level • Maximum Level • Diameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Unlimited 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum Level • Maximum Level • Area
Inflow	<ul style="list-style-type: none"> • Unlimited within a Capacity 	<ul style="list-style-type: none"> • Unlimited 	<ul style="list-style-type: none"> • Inflow Volume • Inflow Patterns
Water Level	<ul style="list-style-type: none"> • Level varies with Storage 	<ul style="list-style-type: none"> • Head (Elevation + Pressure Head) • Head Patterns 	<ul style="list-style-type: none"> • Level varies with Storage
Volume	<ul style="list-style-type: none"> • Time-varying 	<ul style="list-style-type: none"> • Unlimited 	<ul style="list-style-type: none"> • Time-varying

3. 공급 평가 지표

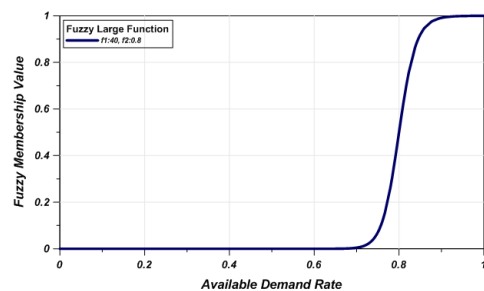
본 연구에서는 비상시 수계전환에 따른 공급능력을 평가하기 위하여 Oak et al. (2018b)이 제안한 퍼지함수 기반의 공급 가능량기준지표(PWSIES)와 공급범위기준지표(PWSRI)를 활용하였다. 해당 지표들은 수리해석 결과와 공급 절점별 가중치를 반영하여 계산되며, 상수관망에서의 공급 성능을 평가할 수 있는 척도로서 활용 가능하다. 예를 들어, 상수도 시설물에서 문제가 발생하여 특정 수용가에서의 용수 공급가능률이 100%에서 각각 90%와 50%로 하락한 경우에 대하여 수요자 입장에서의 만족도 저하정도를 알아보려고 한다. 수리해석 결과로써 산출되는 공급가능비율의 경우, 단순히 수요량 대비 실제 공급 가능한 유량의 비율로써 단순한 계산 값인 90%와 50%로 산정되어 있어 실제 수요자가 느끼는 사용성을 반영하는 데에 한계가 있다. 수요자 입장에서 90%의 공급 가능률을 보이는 경우에는 100% 공급에 비하여 현저한 차이나 불편함을 느끼지 못할 가능성이 크지만, 50%로 하락하게 된다면 상당한 불편함을 느낄 가능성이 높다. 해당 경우에서 실제 사용자가 체감하는 사용성 혹은 만족도 또한 50%로 하락했는지에 대한 평가가 불분명하다. 수요자의 입장에 따라 그 만족도는 그 이상 또는 그 이하의 수치를 보일 수도 있는 바, 50%의 공급률을 보이는 상수도시스템에 대한 만족도 차이는 매우 상이할 수 있다.

이러한 차이를 반영하기 위하여, 지표 산정에 있어 ESRI사에서 사용 중인 Fuzzy Large Membership Function을 활용하였으며, 이를 통하여 실제 수요자가 느끼는 용수의 사용성을 평가하고자 하였다. 해당 함수는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 수식에서 f_1 과 f_2 는 각각 Spread값과 Mid-point값을 나타내며 함수의 형태를 결정하는 변수로써 작용한다.

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



(a) $f_1 = 7, f_2 = 0.5$



(b) $f_1 = 40, f_2 = 0.8$

Fig. 2. Fuzzy large membership function

해당 변수 값들은 전문가 및 운영주체의 의견에 따라 수정 가능하며 할당되는 값에 따라 함수의 형태 및 의미하는 바가 변화한다. Spread 값은 해당 함수에서의 시그모이드 분산 범위와 반비례하며, 값이 클수록 Linear 함수와 가까운 양상을 보인다. Mid-point 값은 그래프의 중심점의 위치를 나타내며, 그 값에 따라 그래프의 위치 및 중심점이 이동한다. 변수 값의 설정에 따른 그래프의 형태는 Fig. 2와 같이 나타난다. 해당 그래프에서 퍼지함수에 대입되는 값(x축)을 상수관망에서의 공급가능률로, 퍼지함수에 의하여 산출되는 값(y축)을 수요자들의 만족도로 간주하여 다음과 같이 해석할 수 있다. Spread 값의 경우 공급가능량의 변화에 따른 수요자들의 민감도로 해석 가능하다. Fig. 2(a)의 경우, Fig. 2(b)에 비하여 완만한 시그모이드 형태를 보이는데 이는 공급가능정도의 변화에 보다 덜 민감하게 반응한다고 평가할 수 있다. Mid-point의 경우, 낙관 및 비관도를 나타내는 수요자의 성향정도를 나타낸다. Fig. 2(b)의 경우, Fig. 2(a)에 비하여 시그모이드의 중심점이 우측으로 편향되어 있는데, 이는 공급률이 70% 정도만 되더라도 만족도가 최하로 떨어지는 양상을 보인다. 따라서 해당 값이 클수록 비관적인 성향을 나타낸다고 평가 가능하다. 이와 같이 두 변수 값을 조정함으로써, 수요자 및 운영주체가 확인하고자 하는 특성의 그래프를 형성하여 성능 지표의 값을 산정할 수 있다. 위의 설명에 더하여 자세한 개념은 본 논문의 2절 및 Oak et al. (2018b)의 3절을 참조한다.

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

공급가능량기준지표는 수리해석 결과를 통하여 계산된, 절점별 수요량 대비 실제로 공급가능한 양의 비율인 공급가능률을 활용한다. 해당 값을 상위에서 제시한 Fuzzy Large Membership Function에 대입하여 모든 절점의 값을 더함으로써 산출할 수 있다. 이 때 공급 가능한 비율로 산정되는 특성상 같은 값의 공급가능률을 보이더라도, 실제 공급가능한 절대적인

용량 값에는 큰 차이가 있을 수 있다. 이에 본 지표에서는 절점별 수요량의 값을 고려한 가중치를 추가로 고려하였다. 가중치는 전체 관망에서의 수요량 총합 대비 해당 절점의 수요량 값의 비율로써 계산된다. 최종적으로 해당 지표는 각 절점의 공급가능률을 퍼지함수에 대입하여 정의된 소속도에 가중치를 곱한 값들의 총합으로 산정된다. 해당 식은 Eq.(2)와 같으며, f_1 은 Spread값, f_2 는 Mid-point값이며, 가중치인 w_i 는 $\frac{\text{Demand of } i_{th} \text{ Node}}{\sum \text{Total Demand}}$ 로 계산된다. 해당 결과를 통하여 상수관망 공급성능에 대한 전체적인 평가가 가능하며, 관망 전체 구역에 대하여 완벽히 수요량을 충족시킬 수 있는 경우에는 1의 값을 갖게 된다.




$$\text{Possible Water Supply PI} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}} \times w_i \right) \quad (2)$$

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

공급범위기준지표는 관망전체의 성능을 평가했던 공급가능량기준지표와 달리, 개별 절점에서의 공급가능정도를 평가한다. 절점에서의 수요량 대비 공급 가능한 유량의 비율을 퍼지 소속 함수에 대입하여 산정된 값을 범위에 따라 등급화 함으로써, 색별로 지도에 매핑하여 범위별 공급 수준 및 정도를 가지적으로 확인할 수 있다. 산정된 값은 Table 3과 같은 범위기준과 색상기준에 의하여 등급화 될 수 있다. 해당 지표 산정을 위하여 사용되는 소속 함수는 Eq. (3)과 같으며, 해당 지표를 활용하여 상수관망에서의 범위별 공급정도를 공간적인 측면에서 평가 가능하다. 이를 통하여 전체적인 영역에서의 공급 가능 정도를 평가할 수 있으며, 비상연계 운영 모의 시에는 추가적으로 공급이 필요한 범위 및 지역 확인이 가능하여 설계보완 및 관리에 이바지할 수 있다.

$$\text{Supply Range PI} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}} \quad (3)$$

Table 3. Classification of supply range performance indicators

Class	Fuzzy Membership Value	Color	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		

3.3 공급 시간 기준 지표 (Possible Water Supply Temporal Indicator)

연계 시의 공급 성능을 시간적인 측면에서 평가하기 위하여, 퍼지 함수를 기반으로 개발된 공급가능량기준지표를 활용하였다. 본 연구에서 제안하는 공급시간기준지표는 시간대별로 정의된 공급가능량지표를 계산한 값을 의미한다. 이는 시간대별로 수요량대비 실제 공급 가능한 유량의 비율(공급가능률)을 Fuzzy Large Membership Function에 대입하여 산정된 값과 절점별 수요량 값을 활용하여 산정된 가중치를 곱한 값을 합산한 결과로, 실제로 수요자들이 공급되는 수량에 대하여 체감하는 사용성을 반영할 수 있다. 무한수원의 법칙을 적용한 기존의 수리해석은 수원의 저류량에 따라 시간대별로 변화하는 공급가능량을 반영하지 못하기 때문에, 해당 지표의 적용에 한계가 있다. 이는 A-PDA 수리해석과 같이 수원의 유한성을 고려할 수 있는 수리해석 모형에만 적용이 가능하며, 이에 따라 상수관망에서 시간대별로 변화하는 공급 성능을 평가할 수 있다. 해당 지표의 값은 시간변화에 따른 수요자들의 만족도를 나타내는 그래프로 표현가능하며, 이는 연계 가능 공급 시간 확인 및 대처방안 수립에 활용될 수 있다.

4. 비상시 용수공급 성능 평가를 위한 모형의 적용

본 연구에서는 비상시 수계전환에 따른 연계 공급의 성능을 시공간적인 측면에서 평가하기 위하여 A시의 관망에서 배수지 파괴에 따른 비상연계 상황을 모의하였다. 시간적인 측면과 공간적인 측면에서의 평가를 위하여 A-PDA 모형을 이용하여 수리해석을 수행하였으며, 해당 결과를 바탕으로 공급 성능 지표를 적용하여 성능 평가를 진행하였다. Oak et al. (2018b)에서 제안한 공급가능량기준지표 및 공급범위기준지표를 산정하였으며, 이를 토대로 제안하는 공급시간기준지표를 산정하였다.

4.1 대상 유역 및 입력 자료

본 연구 대상 지역은 A시의 일부 구역으로(이하 A시), 해당 구역의 상수관망이 공급을 담당하는 면적은 약 5,628.6ha이다. A시의 관망시스템은 3개의 저수지, 1,492개의 절점, 1,937개의 관로, 8개의 펌프, 8개의 감압밸브와 2,055개의 계수밸브로 구성되어 있다. 2018년을 기준으로 3개의 배수지는 84,672세대에 용수를 공급하고 있으며, 각 배수지가 공급을 담당하는 구역은 Fig. 3과 같다. 각 배수지는 해당 블록에 용수를 공급하나, 특정 배수지에서 문제가 발생하여 용수 공급에

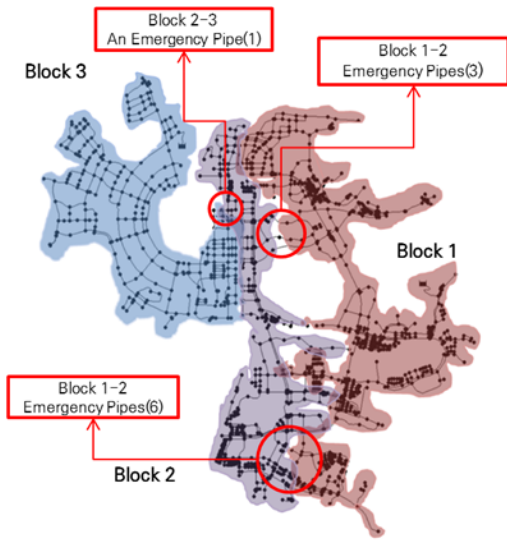


Fig. 3. Layout of the target network

차질이 생길 경우에는 블록 간의 비상 연계를 통해 용수를 공급받도록 한다. 비상 연계는 기존에 설치된 비상관을 통해 실시되며, 비상관의 경우 평상시에는 닫혀 있는 상태로 운영되나 비상 연계 시 개방하여 용수의 연계 공급을 가능하도록 한다. 블록간 연계를 위한 비상관으로는 총 10개이며, 1블록과 2블록을 잇는 비상관 9개와 2블록과 3블록을 잇는 비상관 1개로 구성되어 있다. 본 연구에서는 해당 상수관망에서 배수지 1지에 문제가 발생하여 운영이 중단된 상황에서, 2지와 3지로부터 연계 공급을 받는 시나리오에 대하여 모의하고자 한다.

4.2 배수블록간 비상연계의 수리해석 결과

용수 공급에 문제가 발생한 1지의 배수블록에 대하여, 2지와 3지로부터 연계 공급받는 시나리오에 대하여 모의하였다. 모의시간은 모든 연계 배수지의 저류량이 고갈될 때까지 진행하였으며, 시간대별로 관망 전체에서의 공급가능률을 산정하여 결과로 출력하였다. 제시한 공급가능률은 Eq. (4)에 제시된 바와 같이 계산하였으며, 수식에서 *Required Demand*(m^3/day)는 (*Base Demand* + *Demand Categories*) × *Demand Pattern*와 같이 계산되며, *Available Demand*(m^3/day)는 HOR식에 의하여 계산된 공급 가능 유량이다.

$$\text{공급가능률 (\%)} = \frac{\sum \text{Available Demand}}{\sum \text{Required Demand}} \times 100 \quad (4)$$

수리해석 시 A-PDA의 적용성을 검증하기 위하여 PDA 해석 또한 진행하였으며, 그 결과를 비교하였다. 즉, 무한수원의 가정으로 수리모의가 실시되는 PDA의 경우 2지와 3지의 용수

공급량이 무한대이기 때문에 1지 배수블록에 필요한 수요를 충분히 만족시킬 수 있는 것으로 모의된다. 이는 비현실적인 모의결과이기 때문에 이 결과를 A-PDA 결과와 비교하여 A-PDA 적용성을 검증할 수 있을 것이다. 총족수두는 상수도시설기준(Ministry of Environment Korea, 2010)에 따라 배수관 내 최소동수압 규정 값인 150 kPa를 고려하여 15 m로 설정하였다. 1지 배수블록에 대하여 연계 공급을 모의한 결과, 연계 배수지들은 저류량의 한계로 인하여 각각 15:10시간과 37:20시간 이후에 고갈되었다. Fig. 4는 배수지 문제발생으로 인하여 단수된 1지 배수블록이 수계전환으로 인하여 공급받는 연계 공급률(%)을 나타낸다. PDA 수리해석의 경우 전체 모의시간 동안 수요량의 25% ~ 40% 수준을 꾸준히 공급해 주나, A-PDA 수리해석 결과의 경우 연계공급 시행 15시간 이후 공급률이 현저히 하락하며 38시간 이후에는 연계공급이 완전히 중단되는 양상을 보인다. 또한 Fig. 5의 경우, A-PDA 수리해석 시 단수구역으로 연계공급해주는 배수지들의 시간대별 수위정보를 나타낸다. A-PDA 모델 상의 배수지는 시간대별로 변화하는 유입량과 유출량에 따라 수위가 변화하는 양상을 보인다. 이는 PDA 모델에서 초기수위를 갖는 무한한 규모의 수원으로 설정되는 배수지와 다른 양상을 보이며, 실제 배수지의 운영을 보다 현실적으로 모의함을 확인할 수 있다.

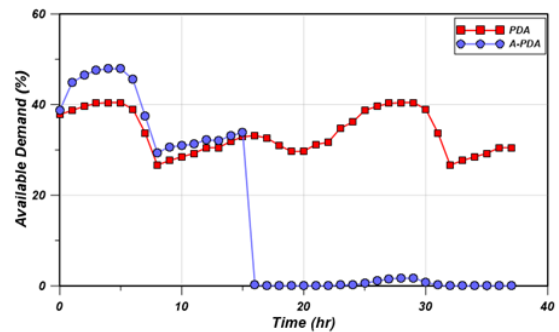


Fig. 4. Available supply rate (%) of block 1

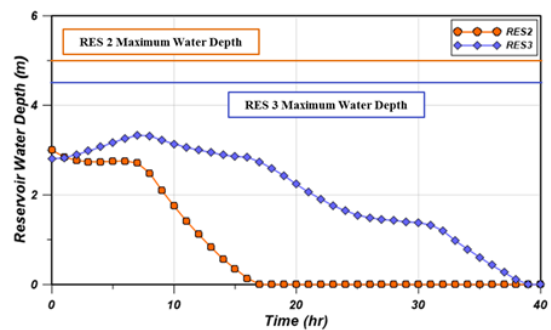


Fig. 5. Reservoir water level of RES2 and RES3

4.3 용수 공급 성능 지표 산정

본 절에서는 4.2절에서의 A-PDA 수리해석 결과를 이용하여 비상시의 용수공급 성능지표를 산정하였다. 3장에서 제시된 바와 같이 Fuzzy Large Membership Function을 활용하였다. 이를 통하여, Spread와 Mid-point 두 가지 변수를 조정함으로써 확인하고자하는 양상의 그래프를 생성하여 수요자들의 성향을 반영한 성능 지표를 산정할 수 있다. Spread 값은 요구수요량 대비 공급 가능한 양의 변화에 따른 수요자들의 민감도와 비례하며, Mid-point 값은 수요자의 낙관도와 반비례한다. 이에 따라 산출된 지표 값은 0~1 범위의 값을 갖으며 수요자들의 사용성을 고려한 만족도를 표현한다. 본 연구에서는 다양한 관점에서의 평가를 위하여 Table 4와 같은 세 가지 변수 조합을 제안하였으며, 그에 따른 지표 산정 결과를 제시하였다. 제안된 변수 조합에 따른 그래프는 Fig. 6과 같다. C1의 경우, 변수 조합 중 가장 긍정적인 성향의 수요자들을 나타낸다. 이는 요구량의 20%수준으로 공급이 되더라도 100%의 만족도는 보인다. 반면 C3의 경우는 가장 부정적인 성향을 대변하는데, Fig. 6상에서 확인 가능하듯이 요구량의 70%수준의 공급에도 최하치의 만족도를 보인다. 본 절에서는 제시된 조합을 활용하여 비상연계 시의 용수 공급 성능의 시공간적 평가를 위한 공급범위기준지표와 공급시간기준지표를 산정하였다.

Table 4. Combination of variables for fuzzy large membership function

Combination	f_1 (Spread)	f_2 (Mid-Point)	Note
C1	30	0.1	Optimistic Assessment
C2	12	0.5	
C3	90	0.8	Pessimistic Assessment

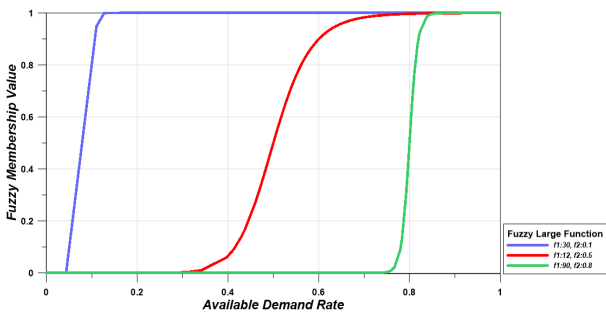


Fig. 6. Fuzzy membership function graph by combinations of variables

4.3.1 공급범위기준지표 산정

배수지 1지의 용수공급 중단으로 인하여 인접 배수지인 2지와 3지로부터 연계공급 시나리오를 A-PDA 수리해석을 통하여 모의한 결과를 활용하여 3절에서 제시한 공급범위기준지표를 산정하였다. 해당 지표는 개별 절점에서의 공급가능 정도를 수요자들이 실제 체감하는 사용성을 반영하여 평가할 수 있는 도구이며, 지도에 매핑함으로써 얼마나 넓은 범위에 어떠한 수준으로 공급이 가능한지를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 제시한 연계공급 상황 중, 연계시작 시간인 0:00시와 배수지 2지 고갈직후인 16:00시에 대한 공급범위기준지표를 Fig. 7에 제시하였다.

퍼지 소속함수에 사용되는 변수로는 Table 4에서 제시한 조합을 이용하였다. Figs. 7(a)~(f)의 경우, 연계공급에 대하여 산정된 공급범위기준지표를 나타낸다. 절점별로 산정된 지표 값은 Fuzzy Large Membership Function을 구성하는 변수 조합설정에 따라 0~1 범위의 값을 가지며, 이는 수요량 대비 공급되는 유량의 비율에 대한 수요자 입장에서의 만족도를 의미한다. 지표 값 1은 수요자의 입장에서 용수 공급에 대한 만족도가 가장 높은 경우를 의미하나, 해당 값을 가진 절점이 수치상으로 100%의 공급가능률로 용수를 공급받았다고 설명되지는 않는다. 낙관적인 수요자들의 경우 더 적은 공급률에도 높은 만족도를 보일 수 있으며, 반대로 비관적인 수요자들의 경우에는 공급률이 조금만 저하되더라도 만족도가 현저히 저하되는 양상을 보일 수 있다. 이는 같은 공급률을 보이는 상황에서도 수요자들의 성향에 따라 그 값이 상이할 수 있음을 시사한다. Figs. 7(a)~(c)의 경우, 연계시작 시간에서의 변수 조합에 따른 공급범위기준지표를 나타낸다. 1지 배수블록의 경우, 고도가 현저히 높아 연계가 불가능한 절점들을 제외한 구역에 연계공급으로 인하여 일정 수준이상의 용수가 공급됨을 알 수 있다. 공급가능비율이 현저히 높거나 낮은 절점들은 변수 조합에 따른 지표 변화가 미미하나, 압력 값에 따라 수요량 대비 일부의 용수만을 공급받을 수 있는 절점들은 변수 조합의 설정에 따라 그 값이 변화하는 양상을 보인다. 구체적으로, 1지와 2지 배수블록의 경계영역에서는 연계 공급에 따라 절점들의 일부 수요량만 만족할 수 있는 양상을 보이는 바, 입력 변수 조합에 따라 상이한 지표 값과 그에 따른 등급을 보여준다. 일부 구역에서는, 낙관적인 변수조합인 Fig. 7(a)의 경우 1등급(Well Supplied)에 속하지만 Fig. 7(c)의 경우에는 5등급(Poorly Supplied)에 속하는 현상을 보인다. Figs. 7(d)~(f)의 경우는 배수지 2지가 고갈된 직후인 16:00시의 연계공급 상황에서의 변수조합에 따른 절점별 공급성능지표를 보여준다. 2지 배수지 고갈로 인하여 Figs. 7(a)~(c)에 비하여 전체적

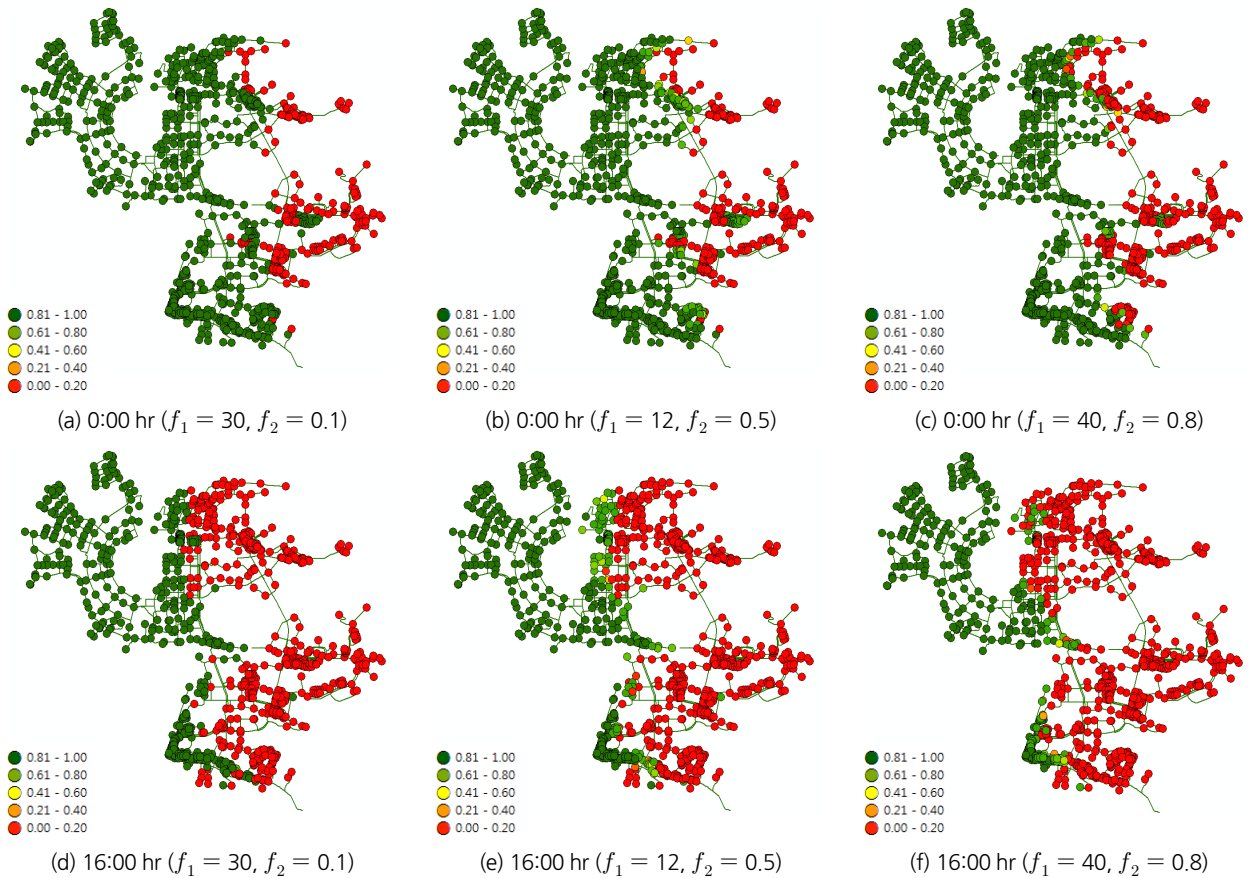


Fig. 7. Possible water supply range indicator by variables and time

으로 1지와 2지의 배수블록에 대한 공급성능이 현저히 저하된 양상을 확인할 수 있다. 마찬가지로 설정한 변수조합에 따라 수요자 혹은 공급운영주체의 성향에 따른 평가 지수를 확인할 수 있는데, C1의 조합에 따른 지표가 타 지표들에 비하여 높은 등급의 결과를 도출함을 확인할 수 있다.

이와 같이 비상연계 모의결과를 활용하여 공급범위기준지표를 적용한 결과, 가시적으로 연계가 가능한 공간을 확인 및 평가할 수 있으며 변수조합의 설정에 따라 수요자 및 공급주체의 성향을 반영하여 공급되는 용수의 사용성까지 평가할 수 있음을 확인하였다. 이는 비상연계 운영계획 수립 및 시설물 운용에 있어서, 공간적으로 보완 혹은 개량이 필요한 범위를 효과적으로 파악할 수 있는 도구로써 활용될 수 있다. 구체적으로, 특정 구역별 지표 값 확인 및 지도상에 매핑된 절점별 색상 확인을 통하여 현황을 파악하고 목표하는 수치의 지표를 얻기 위하여 비상관로에 대한 관경 확장, 추가 설치 및 연계성 향상을 위한 가압장 설치와 같은 정책 수립에 대한 고려가 가능하다. 이와 같이 다양한 관점에서의 평가를 반영한 용수 사용성의 변화 정도를 평가함으로써, 연계 공급 범위 확장을

위한 비상관로의 관경개량 및 추가적인 설치 방안 제시와 같은 계획 수립에 활용될 수 있다.

4.3.2 공급시간기준지표 산정

제한된 공급가능량기준지표를 연계공급이 이루어지는 시간대별로 적용함으로써, 공급시간기준지표를 산정하였다. 해당 지표는 전체관망에서의 공급능력을 시간대별로 평가할 수 있는 지표로 연계에 따른 시간대별 공급성과 연계운영이 가능한 시간에 대한 모의가 가능하다. 연계공급에 따라 변화하는 수원에서의 잔여 저류량을 정확히 모의하기 위해서는 시간에 따른 수원에서의 유출량과 유입량을 고려할 수 있는 수리해석 모형을 적용이 필수적이며, 이에 따라 시간적인 측면에서의 현실적인 평가가 가능하다. Figs. 8(a)~(c)는 Table 4에서 제시한 변수조합조건에 따른 공급시간기준지표를 산정한 그래프이다. 전체 수요량 대비 절점별 수요량의 비율이 가중치로 작용하는 바, 전체 절점에 대하여 100%의 공급가능성을 보일 경우, 해당 지표는 1의 값을 보인다. Fig. 8(a)의 경우 낙관적 성향을 대변하는 변수 조합을 적용한 결과로, 타 그래

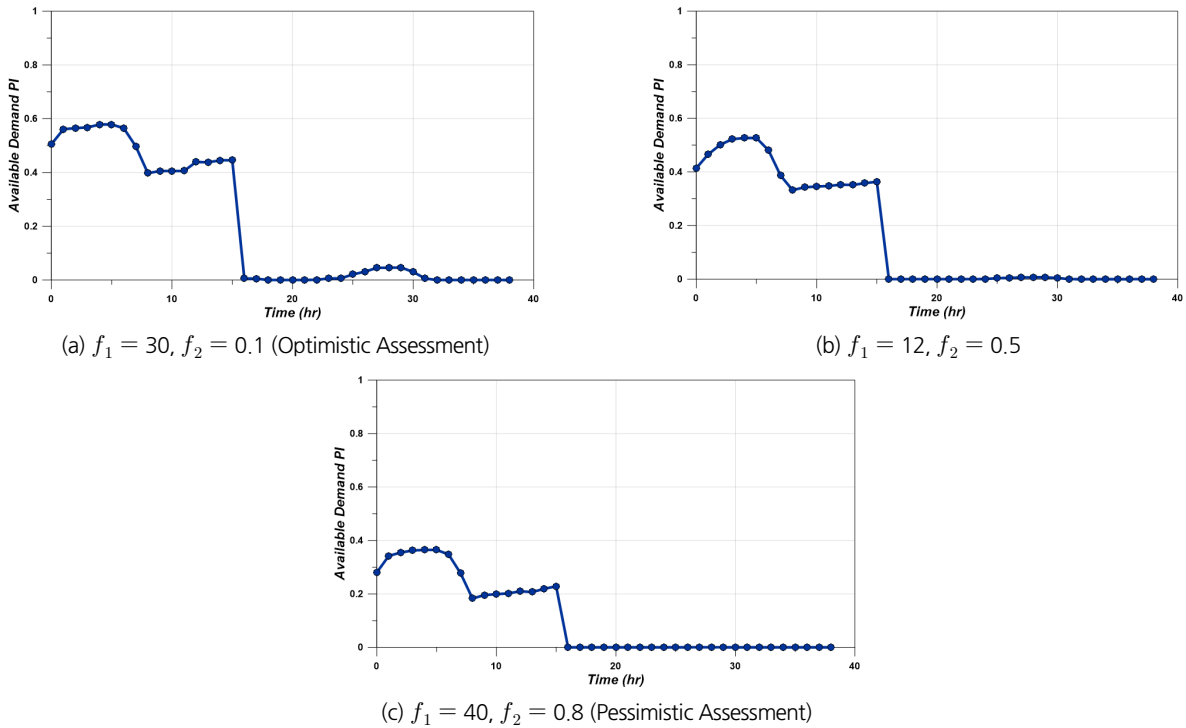


Fig. 8. Possible water supply temporal indicator by variables

프에 비하여 전체 시간대에 대하여 타 변수조합에 따른 지표 값에 비하여 높은 값을 보인다. 특히나 낮은 공급가능률을 보이는 25~31시간대의 경우에는 Figs. 8(b)~(c)에 비하여 높은 지표의 값을 보이는 경향을 확인할 수 있다. 이와 같이 수요자의 성향 및 민감도에 따라, 같은 공급가능률을 보이는 상수관망 시스템에 대한 만족도는 상이하게 평가될 수 있으며 각각 도적인 측면에서의 평가를 통하여 시간대 별 만족도를 확인할 수 있다. 또한 공급시간기준지표를 통하여 전체 시스템에서의 시간대별 공급성능의 변화 경향을 파악할 수 있다. Fig. 8에 따르면, 상수관망에서의 공급성능은 2지 고갈시간인 15:10 시간 이후에 급격히 하락하였으며, 그 이후 37:20시에 3지가 추가적으로 고갈됨에 따라 전체 관망에서의 공급이 중단되었음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 실질적으로 몇 시간동안 어느 수준의 연계공급이 가능한지 평가할 수 있으며, 특정 배수지의 운영중단이 요구될 경우 인접 배수지들로부터의 연계공급을 통하여 단수를 방지할 수 있는 최대시간 등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이는 상수도시설물의 운영에 있어 용이한 정보로써 작용할 수 있으며, 연계 시간확보를 위한 배수지의 용량 및 유입량의 설계에도 이바지할 수 있다. 또한 공급지표 산정 시 변수에 설정에 따른 관점에서의 공급성능 평가가 가능하며, 이 또한 시설물 운용에 있어 폭 넓은 관점에서의 평가 및 고려가 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 배수지 운영중단으로 인한 비상상황에서의 수계전환에 따른 용수공급성능의 시-공간적인 평가를 위하여, 배수지 1지 파괴 시나리오에 따른 수리해석을 하였으며 해당결과를 활용하여 공급성능지표를 산정하였다. 수계전환을 통한 연계공급 수행 시에는 연계배수지 및 비상 연결관로의 제원 및 용량에 따라 연계공급성능이 결정된다. 비정상 상황에서 수리해석이 가능한 PDA기법의 적용으로 공급범위에 대한 평가는 가능하나, 이 또한 무한수원의 가정을 적용하고 있어 시간적인 측면에서의 현실적인 평가에 한계가 있었다. 이에 수원의 저류량 및 용량을 고려할 수 있는 A-PDA 수리해석 기법을 적용하였으며, 이에 따라 시간적인 측면과 공간적인 측면에 대한 수리해석이 가능하였다. 또한 퍼지 소속함수를 바탕으로 제안된 공급가능량기준지표와 공급범위기준지표를 적용하였으며, 이를 바탕으로 시간대별로 연계성능을 평가할 수 있는 공급시간기준지표를 제안 및 적용하였다. 아울러 소속함수 산정에 있어 다양한 관점의 변수 조합을 제시하였으며 이에 따라 변화하는 지표의 값을 확인하였다.

본 연구를 통하여 수계전환으로 인한 연계공급성능을 공간적인 측면과 시간적인 측면에서 평가할 수 있었으며, 다양한 변수 조합에 따른 공급범위기준지표와 공급시간기준지표

산정을 통하여 다양한 관점에서의 평가를 반영한 용수의 사용성 변화 정도를 파악할 수 있었다. 산정된 지표들은 비상연계에 따른 공급능력이 실제 의도와 같이 거동하는지 검토하는데에 활용될 수 있으며, 보완 및 대책이 필요한 지역에 대한 파악이 가능하다. 공간적인 측면에서, 비상관로의 관경과 같은 설계제원이 타당한지 확인할 수 있으며 이에 따라 관경 확장 및 추가적인 관로 설치와 같은 대책 수립 의사결정에 용이하게 활용될 수 있다. 시간적인 측면에서는 연계 가능한 시간과 시간대별 공급 성능 산정이 가능하다. 이에 실제로 연계 가능한 시간을 산정할 수 있으며, 목표하는 연계시간에 따른 인접배수지의 유입량 및 용량에 대한 검토가 가능하다. 이와 같이 계획된 연계공급에 대한 다각도적인 평가를 통하여 타당성 검증이 가능하며 이를 바탕으로 구조적대책수립에 이바지할 수 있음을 확인하였다. 해당 연구는 배수지의 문제발생 상황에 따른 연계공급을 모의하였으나, 추가적으로 Segment 및 특정 구역의 단수에 대한 연계공급 모의를 통하여 보다 다양한 상황에 대하여 활용될 수 있다.

감사의 글

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

References

- 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. In *Analysis of flow in water distribution networks*”. Technomic Publishing.
- Chang, Y., Kim, J., and Jung, K. (2012). “A Study on the Design and Evaluation of Connection Pipes for Stable Water Supply.” *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 2, pp. 249-256.
- Environmental Protection Agency (2011). “*Planning for an Emergency Drinking Water Supply*.”
- 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.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 36, No. 6, pp. 421-428.
- 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.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 4, pp. 121-129.
- Lee, H. M., Jun H., and Kim, J. H. (2018). “Development and Application of Advanced-Pressure Driven Analysis Model considering Limited Reservoir.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 1, pp. 271-280.
- Mays, L. W. (2003). “*Water Supply System Security*.” McGRAWHILL.
- Ministry of Environment Korea (2016). *Statistics of Water Supply and Sewage System*.
- NJDEP (2007). *Interconnection Study Mitigation of Water Supply Emergencies – Public Version*.
- Oak, S., Baek, S., Lee, H. M., and Jun, H. (2018a). “An Application of the A-PDA Model For the Interconnected Operation Among Adjacent Blocks of Water Distribution Systems In Case of Emergency.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 2, pp. 231-237.
- Oak, S., You, K., Noh, H., and Jun, H. (2018b). “A Development of Supply Performance Indicator in a Water Distribution System Using Fuzzy Sets and a PDA Model.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 2, pp. 289-297.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: users manual*. Cincinnati, OH: EPA (US Environmental Protection Agency).
- Shirzad, A., and 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.
- 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.