비상시 수계전환에 따른 적정공급률 결정 방안

Determination of Proper Water Supply Rate for Emergency Interconnection Plan

김수리* · 김아린** · 하정태*** · 전환돈****

Kim, Suri* · Gim, ARin** · Ha, Jeongtae*** · Jun, Hwandon****

Abstract

The deterioration of water supply networks leads to frequent accidents, such as pipe failure, which result in water service interruptions. Depending on the type of accident, a large-scale water service interruption can occur. Therefore, an emergency interconnection plan has been established to prevent interruptions in water service. However, most emergency interconnection plans only consider whether water can be supplied to the region of water service interruption. The area that can actually supply water, emergency water supply area (EWSA), and the possible time required to supply water, emergency water supply time (EWST) are not usually considered. Furthermore, in cases wherein the adjacent local governments or adjacent water supply blocks have insufficient water for the region of water service interruption, it is a good practice to increase the possible water supply time by the reducing the water supply rate (WSR) in order to minimize the damage from the water service interruption. In this study, a method is suggested to determine the proper WSR required to minimize the damage when the amount of emergency water is insufficient. Since it is a case where the amount of emergency water is not sufficient, A-PDA is used to simulate EWSA and EWSA for each WSR. The simulation results are subsequently converted into the customer satisfaction index for each WSR. Through this procedure, the proper WSR can be determined, thereby improving both customer satisfaction and water supply time. Finally, this method is applied to a real water supply network to verify its applicability.

Key words : Emergency Interconnection Plan, Water Supply Rate, A-PDA, Emergency Interconnection Water Supply Time

요 지

상수관망의 노후화에 따라서 관파괴와 같은 운영중단 사례가 자주 발생하고 있다. 발생하는 사고의 종류에 따라서 대규모 단수가 발생할 수 있어서 이를 방지하기 위한 비상시 수계전환을 통한 용수공급 계획이 수립되어 있다. 그러나 비상시 수계전환을 통한 물공급 방안은 대부분 비상관을 통한 인근 지자체나 급수구역에서 물을 공급하는 계획만 수립되어 있고 실질적으로 비상시에 물공급이 가능한 범위(연계공급범위)와 시간(연계공급시간)을 평가하지 않고 있다. 또한 비상시 물을 공급해 주는 인근 지자체나 급수구역에서 충분한 수량을 확보할 수 없을 경우에는 단수지역에 공급률을 조절하여 연계공급시간을 늘리도록 운영하는 것이 단수피해 저감에 효과적인 방법일 것이다. 본 연구에서는 단수지역에 충분한 물공급을 하기 위한 수량이 확보되지 않은 경우에 비상시 적정공급률을 결정할 수 있는 방안을 제시하였다. 물공급이 충분하지 않은 상황을 모의할 수 있는 A-PDA 모형을 사용하여 비상시 수계전환에 따른 연계공급범위와 연계공급시간을 모의하였으며 모의결과를 수요자 만족도 지수를 적용하여 공급률별 수요자 만족도를 정량화하였다. 이를 통하여 수요자 만족도를 높이고 연계공급시간을 늘릴 수 있는 적정공급률을 산정하였으며 제안된 방법을 실제 관망에 적용하였다.

핵심용어 : 비상시 수계전환, 적정공급률, A-PDA, 연계공급시간

*정회원, 하준이앤씨(주) 기업부설연구소 연구원(E-mail: sl950714@naver.com)

Member, Researcher, Hajon Engineers & Consultants

**정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정(E-mail: garim13579@naver.com)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***하남시 상수도과 상수도공사팀장(E-mail: jeongba1@korea.kr)

Head of Team, Water Supply Division, Hanam city

****교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 토목공학과 교수(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

상수관망시스템은 다양한 내·외적 요인에 의해 비정상 상황이 발생하며, 이를 복구하는 과정에서 단수는 필연적으로 잇따르게 된다. 단수는 수요자로 하여금 상수관망시스템의 신뢰도를 저하시키는 요인으로, 이를 방지하는 효율적인 방법 중 하나는 비상관로를 운용하여 인접 수원과의 비상시 수계전환을 실시하는 것이다.

비상시 수계전환을 실시하기 위해서는 수리해석을 통하여 비상시 수계전환의 공간적 측면과 시간적 측면에서의 적절성을 검토하여 비상시 수계전환을 통하여 적절한 범위에 목표 시간동안 용수공급이 가능한지를 분석하여야 한다. 공간적 측면에서의 적절성은 연계 블록들의 상수관망 특성에 영향을 받으며, 적절한 위치에 적절한 제원의 비상관로가 위치하는지, 연계 블록 간 고도차 등에 의해 어느 범위까지 용수를 공급할 수 있는 가로 결정된다. 시간적 측면에서의 적절성은 연계 수원의 특성에 의해 영향을 받으며, 연계 수원의 제원, 유입량, 비상시 수계전환에 의한 추가 공급량 등에 의해 시간적으로 얼마나 용수를 공급할 수 있는 가로 결정된다.

공간적 측면에서의 적절성이 확보되지 못할 경우 연계 수원에서 비상시 수계전환에 의한 추가 공급량이 작아지므로, 시간적 측면에서의 적절성에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 공간적으로 용수를 목표 범위까지 충분히 공급할 수 있다하더라도 시간적 측면에서의 적절성이 확보되지 않을 경우 연계 수원의 고갈 등 운영 중단에 의해 기존 피해지역뿐만 아니라 연계 수원이 공급을 담당하는 기존 블록까지 피해가 발생할 우려가 있다. 이처럼 시간적 측면에서의 적절성이 확보되지 못할 경우, 비상시 수계전환 운영 후 일정 시간이 경과하게 되면 공간적 측면에서의 적절성 또한 확보되지 못하는 상황이 발생하게 된다.

비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성 분석시 고려해야 할 사항은 연계공급시간과 복구시간이다. 복구시간은 파손된 시설물의 규모에 의해 결정되며, 연계공급시간은 연계 수원의 제원에 따른 체류시간, 비상시 수계전환에 의한 추가 공급량, 수원으로의 유입량 등에 의해 결정된다. 비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위해서는 복구시간대비 충분한 연계공급시간이 확보되어야 하며, 만약 복구시간보다 연계공급시간이 작을 경우 연계 수원의 고갈에 따른 추가 피해가 발생할 우려가 있으므로, 복구시간 대비 연계공급시간이 작을 경우 시간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위한 대처방안이 필요하다.

상수도시설기준(ME, 2010)에서는 저수시설 및 수원시설은 수원의 안정성 향상을 위하여 수원의 다계통화, 복수화 등을 통해 비상시 서로 연계되어 운용될 수 있도록 시설을 정비하는 것이 바람직하다고 언급하고 있다. Planning for an Emergency Drinking Water Supply (U.S. EPA, 2011)에서

는 비상시 연계 공급을 실시하여 단수를 최소화하기 위한 비상관로의 필요성, 제수밸브의 필요성 등에 대하여 언급하고 있다. Baek et al. (2008)은 Bentley사에서 제안한 WaterGems 모형의 Pressure-Dependant-Demand (PDD) 모듈을 통하여 비상급수 계획을 평가하였으며, Chang et al. (2012)은 관 파괴에 따른 부족량 기대치를 산정함으로써, 실제 상수관망을 대상으로 비상관로의 적정 관경 설계를 실시하였다. Choi et al. (2014)은 결함트리분석을 이용하여 단수 리스크를 산정하고, 배수권역 연계에 따른 단수 리스크 저감을 산정하였다. Han et al. (2013)은 지방상수도를 대상으로 비상시 용수공급 대책을 제안하고, 수리해석을 통해 공급가능량을 분석하였다. 그러나 이와 같은 연구들은 비상시 수계전환의 공간적 측면에서의 적절성만을 검토하였으며, 시간적 측면에서의 적절성에 대한 검토는 미흡한 실정이다. 비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성을 검토하기 위해서는 연계 배수지가 유한 수원임을 고려해야 하며, Oak et al. (2018a)은 유한수원을 고려한 Advanced-Pressure Driven Analysis (A-PDA) 기법을 적용하여 배수지 운영 중단에 따른 비상시 수계전환 운영시 수리해석을 실시하여 공급성능 지표를 산정하여 시·공간적 적절성을 검토하였다.

본 연구에서는 비상시 수계전환 운영시 시간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위하여 공급률(Water Supply Rate, WSR) 조절에 따른 연계공급시간 확보 방안을 제안하였으며, 실제 A시에 적용하여 연계공급시간의 변화를 분석하였다. 공급률 조절을 실시하게 될 경우, 수요자들의 만족도를 파악하기 위하여, 변수조합에 따른 피지함수를 이용한 공급가능량 기준 지표를 산정함으로써 소비자들의 성향을 반영한 만족도를 분석하였다.

2. 비상시 수계전환 운영 방안

2.1 공급률 조절 방안

비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성은 복구시간 대비 연계공급시간이 긴 상황에 확보되지 못한다. 이는 일반적으로 피해발생시 단수구역의 규모가 클 때, 비상시 수계전환 운영시 공간적 측면에서의 적절성이 확보되어 연계수원에서의 추가 공급량이 많을 경우에 발생한다. 따라서 광역상수도과 지방상수도간 비상시 수계전환, 정수장과 배수지 또는 배수지간 비상시 수계전환 운영시에는 반드시 시간적 측면에서의 적절성을 검토하여야 한다.

본 연구에서는 비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성을 검토하기 위하여 배수지 운영 중단 시나리오에 대해 수리해석을 실시하여 비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성을 검토하고, 연계공급시간을 확보하기 위한 비상시 수계전환 운영 방안을 제안한다.

비상시 수계전환 운영시 연계공급시간에 영향을 미치는 요소는 연계 수원의 유입량, 제원, 및 비상시 수계전환에 의한

추가 공급량이다. 본 연구에서는 비상시 수계전환 운영시 추가 공급량을 조절하기 위해 피해지역의 공급률 조절을 적용하고, 수리해석을 통해 연계공급시간의 변화를 분석하였다.

공급률 조절은 유량조절밸브를 이용하여 적용 가능하며, 이를 위해서는 유량조절밸브의 위치를 결정해야한다. 설치 가능한 위치는 배수지에 직결된 관로에 유량조절밸브를 설치하여 모든 배수블록에 용수를 조절하는 방안과 두 배수블록을 연결하는 비상관로에 유량조절밸브를 설치함으로써 피해가 예상되는 배수블록의 공급률을 조절하는 방안이 있다. 배수지와 직결된 관로에 유량조절밸브를 설치하는 방안은 피해가 발생하지 않은 배수블록에도 용수 공급량을 제한하게 되고, 이에 따라 수요자들의 만족도가 감소하는 상황이 발생하게 된다. 이에 유량조절밸브를 비상관로에 설치하여 피해지역의 공급률 조절에 따른 수리해석을 실시하였다.

2.2 수리해석 기법

상수관망의 대표적인 수리해석 방법에는 수요량을 기반으로 절점에서의 압력과 관에서의 유량을 산정하는 Demand Driven Analysis (DDA) 기법과 압력을 기반으로 압력과 공급량과의 관계식을 이용하여 절점에서의 압력과 관에서의 유량을 산정하는 Pressure Driven Analysis (PDA) 기법이 있다. DDA 기법은 정상상황에 적용시 높은 신뢰도를 보이는 대표적인 수리해석 기법으로, 상수관망의 설계 등에 주로 이용된다. 그러나 수요량을 100% 공급한다는 가정으로 인하여 관 파괴와 같은 비정상상황에서도 수요량을 100% 공급함으로써 부압 등의 비현실적인 결과를 도출한다. PDA 기법은 Head-Outflow Relationship (HOR)을 이용하여 압력에 따른 공급량을 산정하므로, 압력관련 비정상상황에서 DDA보다 높은 신뢰도를 보인다.

비상시 수계전환의 수리해석 적용을 위해서는 압력 기반의 연계 수원으로부터 피해지역에 추가로 공급되는 양에 대한 분석이 가능하여야하며, 이를 바탕으로 연계 수원의 수위 변화와 고갈 여부에 따른 공급가능 시간에 대한 분석이 가능하여야한다. DDA 기법은 압력과 관계없이 연계 수원으

로부터 피해지역의 수요량에 100%에 해당하는 용수량을 공급하므로, 비상시 수계전환 모의에 적합하지 않다. 또한, DDA 기법과 PDA 기법 모두 무한수원의 법칙을 가정하고 있어 연계수원에서의 수위 변화, 고갈여부 등을 분석해야하는 비상시 수계전환 모의에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 Lee et al. (2018)에 의해 제안된 유한수원의 법칙을 가정하고 있는 A-PDA 기법을 적용하여 비상시 수계전환에 대한 수리해석을 실시하였다.

A-PDA 기법은 기존 PDA 기법에 유한수원의 가정을 추가하여, 수원의 시간대별 유입량과 유출량에 따른 수위변화를 분석하는 동시에 절점에서의 압력에 기반하여 공급량을 산정하는 HOR 식을 적용하였다. HOR 식은 Germanopoulos (1985), Wagner et al. (1988), Fujiwara and Ganesharajah (1993), Gupta and Bhawe (1996), Chang and Kang (2014) 등의 연구에 의하여 다양한 형태로 제안되었으며 본 연구에서는 Wagner에 의하여 제안된 Eq. (1)을 적용하였다.

$$Q_{avl} = \begin{cases} Q_{req}, & \text{for } H \geq H_{res} \\ Q_{req} \left(\frac{H - H_{min}}{H_{des} - H_{min}} \right)^{1/m}, & \text{for } H_{min} < H_j < H_{des} \\ Q_{avl} = 0, & \text{for } H \leq H_{min} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

Q_{avl} = available demand (m^3)

Q_{req} = required demand (m^3)

H = pressure (m)

H_{des} = threshold pressure (m)

H_{min} = minimum pressure (m)

기존 기법에서 수원의 역할을 하는 Reservoir 대신 유한수원의 역할을 하는 객체인 Limited Reservoir를 추가하여 배수지에서의 유입량, 제원, 유입패턴, 저류방정식 등을 입력함으로써 수원에서의 수위변화를 고려한 수리해석을 실시한다. Table 1은 Lee et al. (2018)이 제안한 각 수리해석 기법에 따른 특징을 나타낸다.

Table 1. Characteristic Comparison for Hydraulic Analysis Models (Lee et al., 2018)

Characteristics	DDA	PDA	A-PDA
Available Discharge	Demand	Pressure dependent	Pressure and storage dependant
Considering Nodal Pressure	X	O	O
Considering Source Storage	X	X	O
Applicability for Normal Condition	O	O	O
Applicability for Pressure Deficient Condition	X	O	O
Applicability for Storage Deficient Condition	X	X	O
Additional Input Characteristics	-	HOR	HOR, level-storage relation, average inflow and inflow pattern

이에 본 연구에서는 A-PDA 기법을 적용하여 비상시 수계 전환 운영시 피해지역의 공급률을 90%, 70%, 50%, 30%로 조절하여 수리해석을 실시하였다.

2.3 수요자 만족도 산정

연계공급시간 확보를 위해 피해지역의 공급률을 조절하게 되면 수요자들의 만족도가 감소하므로, 수요자들의 성향에 따른 만족도를 분석하기 위해 Oak et al. (2018b)이 제안한 공급가능량 기준 지표를 산정하였다. 공급가능량 기준 지표는 Eq. (2)와 같이 산정된다. 여기서 f_1 은 Spread 값으로 공급가능률에 따른 만족도의 기울기를 결정하며, f_2 는 Mid-point값으로 만족도 50%일 때의 공급가능률을 나타낸다. w_i 는 각 절점별 가중치로, $\frac{\text{Demand of } i_{th} \text{ Node}}{\sum \text{Total Demand}}$ 을 통해 산정가능하다. 공급가능량 기준 지표는 0부터 1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 만족도가 높은 것을 의미한다.

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

f_1 , f_2 의 값은 수요자들의 성향에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구에서는 수요자의 성향이 낙관적인 경우, 비관적인 경우, 중립적인 경우의 변수조합에 따른 만족도를 산정하였다. 수요자의 성향에 따른 퍼지함수는 Jun et al. (2020)이 제안한 값을 적용하였으며, 이는 Table 2 및 Fig. 1과 같다. 이후 각 변수 조합별 공급률 조절에 따른 공급 가능량 기준 지표를 산정 후 지도에 맵핑하여 수요자들의 만족도를 공간적으로 분석하였다.

Table 2. The Parameters of the Fuzzy Functions for Customer Satisfaction Analysis

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

Fig. 1. Graphs of the Fuzzy Functions

3. 상수관망에의 적용

3.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 A시의 일부 구역으로(이하 A시), 면적은 약 5,629 ha이다. 3개의 배수지가 각각의 배수블록에 용수를 공급하고 있으며, 배수블록의 구분은 Fig. 2와 같다. 정상 상황시 각 배수지는 각각의 배수블록에 용수를 공급하나, 비정상상황 발생에 따른 용수 공급에 차질이 발생할 경우 비상관로 운용에 따른 비상시 수계전환을 운영하여 인근 배수지로부터 용수를 공급받을 수 있다. 배수블록간 비상관로는 1지와 2지간 9개소, 2지와 3지간 1개소로 총 10개소가 존재한다. 1지 배수블록은 2지, 3지 배수블록에 비해 고지대에 속하며, 각 배수지의 제원 및 고도는 Table 3과 같다.

Fig. 2. Layout of the Target Network

Table 3. The Properties of the Reservoirs in A City

Reservoirs	Elevation (m)	Volume (m ³)	Maximum Level (m)
RES1	134.7	35,218	5
RES2	79.7	23,042	5
RES3	85.7	29,268	4.5

3.2 공급률 조절 방안의 적용

2지 배수지 운영 중단시 비상시 수계전환 운영에 의해 1지 배수지와 3지 배수지로부터 용수를 공급받게 된다. A-PDA 수리해석 결과, 1지와 3지 배수지는 각각 비상연계 시작 후 12시간 10분과 36시간 50분 후에 고갈되며, 고지대인 1지 배수지로부터 용수를 공급받아 배수블록 내 모든 절점에

서 용수가 100% 공급 가능한 것으로 나타났다.

연계공급시간을 확보하기 위해 2지 배수블록의 공급률을 100% 대비 90%, 70%, 50%, 30%로 조절한 결과, A시 전체의 시간대별 공급가능률은 Fig. 3과 같다. 공급률 조절에 따라 연계공급시간은 Table 4와 같이 1지 배수지 운영중단 시간인 12시간 30분, 13시간 10분, 14시간 10분, 15시간 50분 동안 확보됨을 확인할 수 있으나, 공급률 조절에 의해 A시의 전체 공급가능률은 100%에서 80%까지 감소하는 양상을 보인다. 공급률 100%일 때 시간대별 수요 패턴이 큰 08:00시에 공급가능률이 현저하게 감소하나, 공급률 30%일 때는 수요 패턴이 큰 08:00시에 공급가능률이 현저하게 감소하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 고배수지인 1지 배수지가 2지 배수블록에 용수를 100% 공급하게 됨에 따라, 비상시 수계 전환 운영에 의한 공급량 증가로, 수두손실에 의해 1지 배수지가 담당하는 블록의 압력 부족이 발생하여 공급가능률이 저하된다. 공급률이 90%, 70%, 50%, 30%로 감소하게 되면 비상시 수계전환 운영에 의한 추가 공급량 또한 감소하게 되어, 공급가능률이 크게 감소하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 3. The Change in the Available Supply Rate by Changing in WSR

Table 4. Simulated Emergency Inter-connection Operation Time by Changing in WSR

WSR (%)	RES1 Depletion (hr)	RES3 Depletion (hr)
100	12:10	36:50
90	12:30	38:20
70	13:10	42:20
50	14:10	46:50
30	15:50	58:50

수요자의 만족도는 수요자의 성향에 따라 변하며, 공급률 50%일 때 변수조합에 따른 수요자의 만족도는 Fig. 4와 같다. 수요자의 성향이 긍정적인 때 1지 배수블록 내 일부 절점을 제외하면 A시 모든 절점에서 만족도가 81%~100%로 나타난다. 수요자의 성향이 중립적일 경우, 피해지역인 2지 배수블록의 공급률을 50%로 조절함에 따라 2지 배수블록의 만족도가 41%~60% 사이로 나타났으며, 부정적일 경우 피해지역인 2지 배수블록의 만족도가 0%~20%로 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 수요자의 성향이 중립적일 때 비상시 수계전환 운영 시작으로부터 13시간 경과 후 공급률 조절에 따른 수요자들의 만족도를 나타낸다. 공급률이 100%, 90%일 때 비상시 수계전환 운영 13시간이 경과할 경우 1지 배수블록이 고갈됨에 따라 1지 배수블록에 만족도가 0%~20%의 값으로 나타났으며, 2지 배수블록의 경우 일부 구역은 3지 배수지로부터 용수를 공급받아 만족도가 일부 확보되었으나, 1지 배수지로부터 용수를 공급받던 지역은 만족도가 0%~20%로 감소함을 확인할 수 있다. 공급률이 70%일 경우 1지 배수지가 13시 10분에 고갈되므로, 공급률 100%, 90%의 경우와 다르게 13시에 2지 배수블록에 용수를 공급할 수 있어 2지 배수블록의 만족도가 61%~80%로 산정된다. 공급률이 50%일 경우 공급률 70%와 마찬가지로 13시에 2지 배수블록에 용수를 공급할 수 있으므로, 2지 배수블록의

Fig. 4. Results of the Performance Indicator in Case of WSR 50% and the Three Fuzzy Functions of the Customer Satisfaction

Fig. 5. Results of the Performance Indicator by Changing WSR with the Neutral Fuzzy Customer Satisfaction

Table 5. Results of the Performance Indicator by Each WSR

Time	Performance indicator by each WSR (%)				
	100	90	70	50	30
00:00	0.9892	0.9891	0.9849	0.8593	0.7297
01:00	0.9893	0.9892	0.9849	0.8593	0.7315
02:00	0.9893	0.9892	0.9804	0.8595	0.7370
03:00	0.9893	0.9892	0.9840	0.8614	0.7391
04:00	0.9893	0.9892	0.9849	0.8626	0.7393
05:00	0.9893	0.9892	0.9849	0.8625	0.7394
06:00	0.9893	0.9892	0.9849	0.8593	0.7348
07:00	0.9885	0.9888	0.9848	0.8593	0.7297
08:00	0.9547	0.9672	0.9743	0.8117	0.7294
09:00	0.9707	0.9780	0.9808	0.8589	0.7294
10:00	0.9752	0.9800	0.9828	0.8589	0.7292
11:00	0.9789	0.9811	0.9839	0.8589	0.7293
12:00	0.9813	0.9820	0.9859	0.8860	0.7292
13:00	-	-	0.9844	0.8590	0.7296
14:00	-	-	-	0.8591	0.7297
15:00	-	-	-	-	0.7297
Total	12.7745	12.8013	13.7658	12.8754	11.7159

만족도가 41%~60%로 산정된다. 공급률이 30%일 경우에는 1지 배수지로부터 2지 배수블록에 용수가 공급되나, 중립적인 수요자의 성향에 의해 공급률이 30%일 경우 만족도가 0%~20%로 산정된다.

이후 비상시 수계전환 운영시 적정 공급률을 결정하기 위하여, 연계공급시간동안 산정된 시간대별 만족도를 총합하여 공급률에 따른 전체 만족도를 산정하였으며 결과는 Table 5와 같다. 공급률이 100%일 때 수요패턴이 최대가 되는 08시에서 전술한 바와 같이 1지 배수블록에서 압력부족에 따른 공급성능이 감소하여 만족도지수가 0.9547까지 감소하였으며, 전체 만족도는 12.7745로 나타난다. 공급률이 90%로 조절될 경우 1지 배수지로부터 2지 배수블록으로 공급되는 용수의 양이 공급률 100% 대비 감소하므로, 압력부족에 따른 공급성능이 적게 감소하여 전체 만족도는 공급률 100%보다 큰 12.8013으로 나타난다. 공급률이 70%일 때 연계공급시간이 1시간 추가로 확보되어, 전체 만족도는 최대 13.7658로 나타난다. 공급률이 50%, 30%일 때의 경우 연계공급시간은 증가하나, 공급률에 따른 시간대별 만족도가 크게 감소하여 전체 만족도는 각 12.8754, 11.7159로 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 비상시 수계전환 운영시 시간적 측면에서의 적절성을 확보하기 위해 비상시 수계전환의 운영 방안을 제안하였다. 비상시 수계전환의 시간적 측면에서의 적절성은 복구시간과 연계공급시간에 의해 결정되며, 연계공급시간을 결정하는 요인에는 연계 수원의 유입량, 제원, 비상시 수계전환에 의한 추가 공급량이 있다. 본 연구에서는 비상시 수계전환 운영 방안으로 연계 수원의 추가 공급량을 조절하는 방안을 제안하였으며, 실제 A시의 2지 배수지 운영 중단 시나리오에 적용하여 제안된 방법의 적용성을 검증하였다. 공급률을 100%대비 90%, 70%, 50%, 30%로 조절하는 방안을 적용하여 수리해석을 실시하여 연계공급시간 및 수요자의 만족도를 산정하였다. 공급률을 100%에서 30%로 조절함에 따라 1지 배수지에서 공급할 수 있는 연계공급시간이 12시 10분에서 15시 50분까지 확보되는 것으로 나타났다.

공급률 조절에 의한 수요자의 만족도를 공급 가능량 기준 지표를 통해 산정하였다. 수요자의 성향을 반영하기 위해 3가지 변수조합을 제안하였으며 공급률 50%일 때 변수 조합에 따른 만족도를 분석하였다. 공급률이 50%일 때 수요자들의 성향에 따라 만족도가 각 81%~100%, 41%~60%, 0%~20%로 산정되었다. 이후 수요자의 성향이 중립적일 때 13시에서 공급률 조절에 따른 만족도를 분석하였다. 공급률이 100%, 90%일 때의 경우 연계 배수지인 1지 배수지 고갈에 의해 2지 배수블록 내 대부분의 수용가에서 만족도가 낮게 나타났으며, 일부지역만 3지 배수지로부터 용수를 공급받아 만족도

가 확보되었다. 공급률이 70%, 50%일 때는 공급률 100%, 90%일 때와 달리 1지 배수지 고갈시간이 13시 이후이므로, 2지 배수블록의 만족도가 공급률 100%, 90%일 때 대비 높게 산정된다. 공급률이 30%일 때의 경우 공급률 70%, 50%와 마찬가지로 1지 배수지로부터 2지 배수블록으로 용수가 공급되나, 중립적인 수요자의 성향상 공급률이 30%로 제한되면 만족도가 낮게 산정되어 만족도가 낮게 산정된다.

이처럼 공급률을 조절하게 되면 연계공급시간은 확보가 가능하나 공급률 조절에 따른 수요자들의 만족도가 감소할 수 있으므로, 연계공급시간과 수요자의 만족도를 고려한 적정 공급률을 선정하여야한다. 적정 공급률을 결정하기 위하여 공급률 조절에 따른 연계공급시간별 만족도를 총합하여 전체 만족도를 산정한 결과, 중립적인 성향의 수요자의 경우 공급률이 70%일 때 전체 만족도가 최대인 것으로 나타났다.

향후 연구에서는 비상시 수계전환의 공간적 측면과 시간적 측면에서의 적절성을 검토하여, 공급성능 개선방안과, 공급성능 개선에 따른 연계공급시간의 변화를 분석하여 적정 운영 방안을 결정하면 비상시 수계전환의 시·공간적 적절성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Baek, C.W., Jun, H.D., Kim, J.H., Yoo, D.G., and Lee, K.C. (2008). Evaluation of emergency water supply plan for block system of water network using WaterGEMS. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 8, No. 6, pp. 15-20.
- Chang, 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.
- 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.
- Choi, T., Kim, A., Kim, M., and Koo, J. (2014). A study on optimal planning of risk reduction for water suspension in water pipe system using fault tree analysis. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 28, No. 6, pp. 699-711.

- 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.
- Gupta, R., and Bhawe, P.R. (1996). Comparison of methods for predicting deficient-network performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 3, pp. 214-217.
- Han, W., Jung, K., and Kim, J. (2013). Hydraulic adequacy of connection pipes in water supply systems for contingencies. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 27, No. 6, pp. 679-687.
- Jun, H.D., Gim, A., Oak, S., and Jung, D. (2020). Development of a fuzzy-function-based performance indicator for water distribution system's emergency condition. *Water*, Vol. 12, No. 8, 2296. doi:10.3390/w12082296
- Lee, H.M., Jun, H., Back, S.C., and Kim, J.H. (2018). Development and application of advanced-pressure driven analysis model considering limited reservoir. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 271-280.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Design standard for water distribution systems*.
- Oak, S., Baek, S.C., 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. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 231-237.
- Oak, S., You, K., Noh, H.S., and Jun, H. (2018b). A development of supply performance indicator in a water distribution system using fuzzy sets and a PDA model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 289-297.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Planning for an emergency drinking water supply*. EPA 600/R-11/054.
- 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.

Received	October 22, 2020
Revised	October 22, 2020
Accepted	October 29, 2020