



# 시뮬레이션과 1일 급수량 분석을 이용한 갈수기 감압에 의한 제한급수 방법

## Pressure restricted water supply method during drought using a computer simulation and daily water supply analysis

남영욱<sup>1</sup>·김경수<sup>2</sup>·현인환<sup>2</sup>·김두일<sup>2\*</sup>

Youngwook Nam<sup>1</sup>·Kyungsu Kim<sup>2</sup>·Inhwan Hyun<sup>2</sup>·Dooil Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>도쿄도립대학교 토목환경공학과, <sup>2</sup>단국대학교 토목환경공학과

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University

<sup>2</sup>Civil and Environmental Engineering, Dankook University

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

### ABSTRACT

Due to global climate change, mega-droughts have occurred frequently. Since long-term droughts make it difficult to secure the water resources, water supply needs to be restricted in a reasonable manner. In the event of limited water supply, the waterworks need to develop a restricted water supply strategy. This study showed that analyzing daily water supply could be used to respond to the first stage of a drought. According to an analysis of Korea's major water authorities, there was about 7~21% of room for daily minimum water supply in case of a drought. Restricting the water supply by lowering pressure is a good strategy for local water authorities with high water leakage rate since leakage is inversely dependent with pressure. For this method, it is necessary to quantify water deficiency and pressure at each node using a simulation. Since DDA-based software is not possible to predict changes in demand at nodes with pressure reduction, WaterGEMS, a PDA software, was used to quantitatively predict water shortages and pressures at each node. Locations where water is deficient need to install booster pumps or to be dispatched with water tank truck and bottled water. Without these support, lowering pressure could not be an option for water works. This paper suggests a method for

Received 4 September 2020, revised 21 September 2020, accepted 23 September 2020.

\*Corresponding author: Dooil Kim (E-mail:dikim21@dankook.ac.kr)

- 남영욱 (박사과정) / Youngwook Nam (Ph.D. Student)  
Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo, Japan 192-0397
- 김경수 (연구원) / Kyungsu Kim (Researcher)  
경기도 용인시 수지구 죽전로 152, 16890  
152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Republic of Korea
- 현인환 (교수) / Inhwan Hyun (Emeritus Professor)  
경기도 용인시 수지구 죽전로 152, 16890  
152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Republic of Korea
- 김두일 (부교수) / Dooil Kim (Associate Professor)  
경기도 용인시 수지구 죽전로 152, 16890  
152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

waterworks to plan a drought by lowering pressure to restrict water supply using daily water supply analysis and PDA based simulation.

**Key words:** Restricted water supply during drought, Daily water supply analysis, Pressure restricted water supply, Water distribution network simulation, Emergency water supply

**주제어:** 가뭄시 제한급수, 1일 급수량 분석, 압력 제한 급수, 상수관망해석, 가뭄시 비상급수

## 1. 서 론

2015년 6월에 강원 영동과 영서, 경기 지역은 강수량이 각각 예년의 39%, 64%, 55%에 불과할 정도로 심각한 가뭄이 겪었다 (Kim, 2015a). 이러한 가뭄으로 소양강댐과 충주댐의 저수율이 예년의 65% 수준에 머무는 등 가뭄으로 인한 물부족 현상이 심각하였다 (MOLIT, 2015). 우리나라는 계절적인 특성상 연 강수량의 약 66%가 여름의 장마철에 치중되어 있으며, 봄철에는 강수량 부족으로 인한 계절적 가뭄이 빈번하게 발생한다 (Korea Meteorological Administration, 2017). 지형학적으로도 유역경사가 급하고, 면적이 작으며, 유로연장도 짧아 우천시 수자원이 일시적으로 대량 유출되는 특징이 있었다 (Kim, 2005). 이러한 특성으로 인해 계절 및 지역적으로 물부족이 발생할 수 있고, 상수원수의 수급에도 상당한 어려움이 발생한다 (K-water, 2016).

가뭄시에는 수자원을 최적으로 활용하기 위한 구체적인 대응체계를 확립하여야 한다. 정부에서는 재난 및 안전관리 기본법에 따라 중앙 및 지방자치단체의 재난관리체계를 마련하였다 (Ministry of the Interior and Safety, 2015). 또한, 가뭄 피해가 심각했던 충남 서부지역의 8개 시·군에 제한급수를 통한 공급량 절감대책을 마련하여 안정적인 단계별 제한급수 가이드라인도 만들었다 (Ministry of Environment, 2016). Table 1은 생활용수에 대해 ‘가뭄 재난 위기관리 표준 매뉴얼’에서 제시하고 있는 단계별 제한급수 기준이다 (Ministry of the Interior and Safety, 2015). 그러나 이 가이드라인은 가뭄단계에 따른 제한공급량 기준은 제시하였지만, 구체적인 급수조정 방안에 대한 설명은 다소 불명확하다는 한계점을 가지고 있었다.

제한급수를 위한 급수조정을 하는 방법은 배수지에서의 시간당 유출 유량의 변동은 없지만 정해진 시간에만 수요자에게 물을 공급하는 시간급수 방식과 물공급의 시간적 제한은 없지만 배수지에서의 시간당 유출 유

량을 제한하는 감압급수 방식이 있다 (AWWA, 2019; Lee et al., 2012). 시간급수 방식은 지형조건과 관계없이 급수시간에는 수요처에 모두 배분할 수 있다는 장점이 있지만, 급수 시간 동안에 수요자가 물을 대량으로 저장하고, 관망 내부의 물이 비급수 시간에 누수가 되며, 공급 재개시 관내 수압이 갑작스럽게 상승하는 과정에서 여러 가지 문제(수충격, 공기층 형성 등)가 발생할 수 있으며, 상대적으로 높은 압력 때문에 저지대 관망에서 누수량이 많다는 단점이 있다 (Yang et al., 2014). 유수율이 높은 지자체는 관망의 수압에 따른 누수율의 차이가 적겠지만, 유수율이 낮은 지자체는 수압에 의한 누수율에서 차이가 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 시간급수를 하고자 할 때는 해당 지역의 유수율 현황을 사전에 검토해 볼 필요가 있다. 유수율이 낮은 지자체는 감압 제한급수 방식을 고려해 볼 필요가 있다. 그러나 관망의 압력을 낮추면 급수구역의 고지대에서는 단수 혹은 낮은 압력의 문제가 생기기 때문에 해당지역의 민원이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 지역의 고저차가 심한 급수구역에서는 적용시 충분한 사전 검토가 필요하다. 단수가 되는 지역을 위한 물차나 병물 등의 비상보급 체계도 구축하여야 하고, booster pump 등의 설치도 고려하여야 한다. 장기적으로 관망의 수압을 균등하게 만드는 블록화 시스템이 완벽하게 구축이 된다면 (Kim et al., 2015b), 감압에 의한 제한급수 방법의 효과가 커질 것이다.

Table 1에서 규정한 급수량의 기준이 1일 최대급수량인지 1일 평균급수량인지에 대한 정의는 원문에서 명확하지 않다 (Ministry of Environment, 2016). 생활용수의 공급량은 계획인구, 급수보급율, 1인 1일 평균사용량, 유수율, 침투부하율로 결정된다. 여기서 계획인구, 급수보급율, 1인 1일 평균사용량, 유수율만을 고려하여 산정한 것을 1일 평균급수량이라 하며, 1일 평균급수량에 침투부하율을 곱한 것을 1일 최대급수량이다. 1일 급수량 분포나 침투부하를 분석하면, 해당 급수구역의 물사용량 패턴을 알 수 있다. 따라서, 이를 바탕으로 갈수

**Table 1.** Classification of drought stage and standard for restricted water supply

Drought Stage	Stage 1 (Abnormally Dry, Blue)	Stage 2 (Moderate Drought, Yellow)	Stage 3 (Severe Drought, Orange)	Stage 4 (Extreme Drought, Red)
Water Supply	Reducing less than 10~30%	Reducing less than 30~50%	Reducing less than 50%	Water outage

기 대책을 짜는 것이 가장 합리적인 방법이 될 것이다. 침투부하는 1년 중 가장 급수량이 많은 날의 급수량(1일 최대급수량)을 1일 평균급수량으로 나눈 값이다. 일반적으로 많은 수도사업자는 1일 급수량 자료를 축적하고 있으므로, 실제 측정 자료를 사용하여 1일 최대, 최소 급수량과 침투부하를 구할 수 있다. 그러나, 1일 급수량 자료를 구하기 힘든 수도사업자도 있으므로, 급수인구로부터 침투부하를 예측하는 노력도 있었다. 침투부하와 급수인구의 관계를 수식으로 나타낼 때, 자료의 산포도가 문제가 된다. 특히 급수인구가 적은 지역에서는 산포도가 너무 커서, 비초과확률 혹은 그룹핑 기법 등 다양한 방법을 사용하여 수식화가 시도되었다.

시간급수 방식에 관한 연구는 이미 다른 연구자에 의해 이루어진 적이 있었다 (Charalambous, 2001; Yang et al., 2014). 그러나 감압에 의한 제한급수 방식에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 감압을 이용한 제한급수를 시행하는 경우 고지대에 거주하는 수요자의 일부는 가정용수를 공급받지 못할 수 있으므로, 시물레이션을 통해 이러한 구역을 먼저 파악한 후 대책을 수립하여야 한다. 대책의 예에는 booster pump의 설치, 물차와 병물의 특별 공급 등이 있다. 단계별 제한급수 감량공급 기준을 토대로 수도사업자는 시물레이션을 통해 단수 피해 지역을 예측하고 대책의 적정성을 분석하여, 이 방법을 사용할지를 결정하여야 한다. 시물레이션을 통한 상수관망의 해석법은 절점에서의 압력과 수요량의 관계에 따라 2가지로 분류된다. 용수수요는 항상 만족한다는 전제하에 절점 수두를 계산하는 DDA(Demand-Driven Analysis) 이론과 절점에서의 수두에 따라 용수공급량이 변하는 것을 고려하여 절점에서의 가능 용수공급량과 수두를 동시에 계산하는 PDA(Pressure-Driven Analysis) 이론이 있다 (Baek et al., 2007; Shih and ReVelle, 1995). DDA 이론을 기반으로 수리해석을 수행하는 경우 수요가 수압과 관계없이 항상 일정하게 되어 절점(Node)에서의 수요부족(demand shortage)을 산정하는 것이 불가능하다 (Wu, 2016). DDA 이론의 모형들은 비정상상태(화재 발생으

로 절점의 용수수요가 급증, 관거 파손 등에 의한 절점수두 부족 등)에서 부압이 계산되는 것과 같은 비현실적인 결과를 보여줄 수 있다 (Baek et al., 2007). 이러한 현상은 각 수요지점의 필요용수량이 비정상상태인 경우에도 정상상태와 같이 인식되는 DDA 모형의 특성으로 인해 발생한다. 실제 상수관망이 비정상상태인 경우 각 수요지점의 필요용수량은 충족되지 않을 수 있다 (Ang and Jowitt, 2006). 그러나, PDA 해석은 각 절점에서의 용수공급이 절점수두-용수공급 관계(Head-Outflow Relationship, HOR)에 따라 변하는 것을 고려한 것으로 DDA 모델들이 가진 비정상 상태 해석의 부정확성을 보완할 수 있는 개념이다 (Oak et al., 2018; Ravi et al., 2019). 즉, 가뭄단계에 따른 제한급수를 모의하였을 경우 수요부족이 발생하는 지역과 그렇지 않은 지역을 구분 지을 수 있으며, 사전에 부족량을 집계하여 대비 할 수 있게 되는 것이다. PDA 해석이 가능한 대표적인 소프트웨어는 EPANET 2.2나 WaterGEMS가 있는데, 본 연구에서는 WaterGEMS를 사용하여 단계별 제한급수 시물레이션을 실시하였다 (Bentry, 2017; Rossman et al., 2020).

본 논문의 목적은 갈수기에 효율적인 가정용수의 급수계획의 마련을 위해 수도사업자가 수립하는 전략 작성에 도움을 주는 것이다. 1일 급수량이나 침투부하로부터 1일 최대급수량과 1일 최소급수량을 구하여, 갈수기 1단계(관심단계)의 용수공급 전략 수립에 활용하는 방법을 제시한다. 또한, PDA 방식의 시물레이션을 활용하여, 각 절점에서의 부족한 가정용수의 양 및 압력을 예측하고, 이상 절점에 대해 특별 용수공급이 가능한지를 평가하여, 감압밸브에 의한 제한급수가 적용 가능한지를 분석하는 방법을 제시한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 대상 지역

본 연구에서는 가뭄이 심각했던 ○○지자체를 대상

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

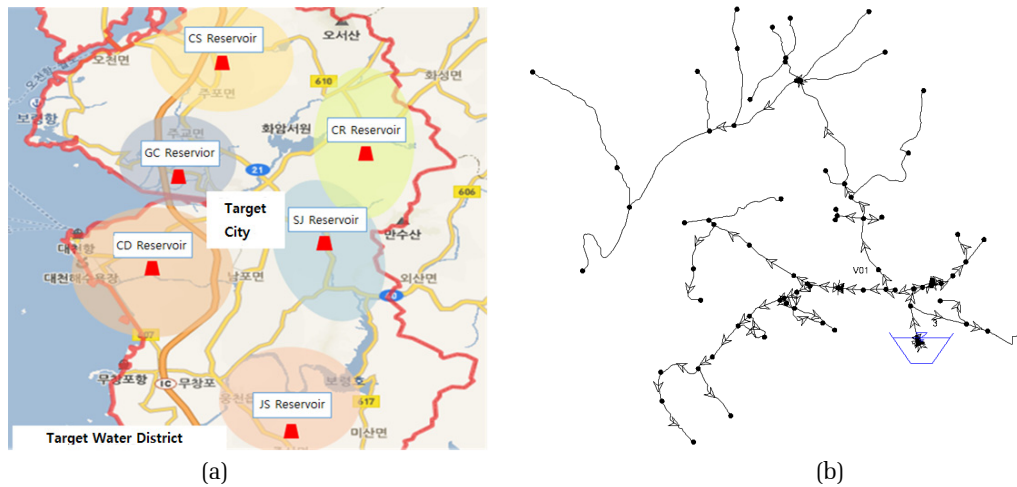
pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

**Table 2.** Water supply at each drought stage for the CR water district

Drought Stage Classification	Water Supply Ratio [%]	Water Supply [m <sup>3</sup> /day]	Water Deficit Ratio [%]	Water Reduction [m <sup>3</sup> /day]
Usual supply	100	631	0	0
Stage 1 (Abnormally Drought, Blue)	90	568	10	63
Stage 2 (Moderate Drought Yellow)	70	442	30	189
Stage 3 (Severe Drought, Orange)	50	315.5	50	315.5



**Fig. 1.** Six water distributing reservoirs in the city (a) and Pipe network diagram of CR water distribution district (b).

으로 선정하여, 갈수기에 용수공급을 위한 감압에 의한 단계별 급수조정 및 운영방안의 예시를 만들었다. ○○지자체의 6개 급수구역 중 하나인, CR배수지 급수구역을 대상으로 하였다. ○○지자체는 급수인구 84,204명으로 구성되어 있으며, 아래 Fig. 1과 같이 GC, SJ, JS, CD, CR, CS의 6개의 배수구역으로 구분되어 상수를 공급하고 있다. 이 중 CR 배수구역의 1일 평균급수량은 427 m<sup>3</sup>/일이다. ○○지자체의 침투부하 계수인 1.4787을 고려하여 631 m<sup>3</sup>/day를 CR지역의 평시 수요량(1일 최대급수량)으로 산정하였다. Table 2는 CR 배수구역의 각 가뭄 단계에 따른 공급량을 보여주고 있다.

## 2.2 소프트웨어

WaterGEMS (Bentley Systems, Exton, PA, USA) 소프트웨어를 활용하였다. WaterGEMS는 PDA기반이기 때문에 압력부족에 의한 물공급 부족을 정확히 시물

레이션할 수 있을 뿐만 아니라, 밸브개폐(개도율 조절)를 통한 유량조절을 반영할 수 있는 기능이 있어 감압밸브를 이용한 제한급수 모사에 적합하다. HOR(Head Outflow Relationship)은 WaterGEMS의 내장 함수인 power function을 이용하였으며(Bentley, 2017; Wagner et al., 1988), 지수(Power Function Exponent)는 0.5를 사용하였고, threshold pressure는 0으로 가정하였다 (Świtnicka et al., 2017).

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 1일 급수량 변동 분석을 통한 초기 가뭄 대처 계획 수립

침투부하나 1일 급수량 분포를 분석하면 해당 급수 구역의 물이용 특성을 알 수 있다. 1일 최대, 평균, 최소급수량은 갈수기에 급수계획을 세울 때 중요한 변

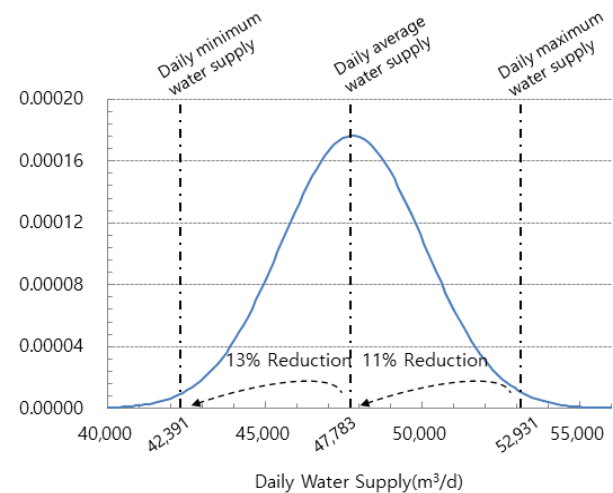
**Table 3.** Peaking factors at each service population with non-exceedance probability of 80%

Population [×1000]	8.5~10	10~25	25~40	40~70	70~100	100~200	200~400	400~700
Peaking Factor	1.6215	1.5852	1.5385	1.5108	1.4787	1.4381	1.4017	1.3528

수이다. 특히, 1일 최소급수량은 해당 도시에서 시민들이 과거에 일간 사용한 급수량이고, 시민들이 약간의 불편함을 감수하면 되므로, 관심(Blue) 단계에서 참고할 수 있는 양이다. 첨두부하는 급수구역의 급수인구에 따라 다른 값을 보인다. 급수인구가 작은 경우 첨두부하의 산포도가 매우 크다. 급수인구 구간별 첨두부하의 예는 Table 3과 같은데, 연간 1일 급수량은 정규분포에 가깝다고 가정하고, 80%의 비초과 확률을 적용하여 신뢰성이 떨어지는 양극단의 이상자료를 제거한 후 얻은 값이다.

Table 1에서 가뭄 단계별 급수량이 1일 평균인지 최대인지에 대한 명확한 설명이 없지만 이를 1일 최대급수량이라고 가정하고, 급수인구 8만명 정도의 도시를 예로 활용하여 첨두부하 혹은 1일 급수량 분포를 이용하여 갈수기 급수량을 분석하였다. 대부분의 지자체는 1일 급수량 자료를 가지고 있으므로 이것을 분석하는 것이 갈수기 대책을 만드는 중요한 시작점이다. Fig. 2는 1일 급수량 자료의 분포도로서 국내 정수장 운영데이터를 기반으로 작성한 것이다. Fig. 2과 같이 급수량을 분석해보면, 급수량의 변화가 어느 범위에 있는지 쉽게 알 수 있다. 해당 정수장의 1일 평균급수량은 47,783 m<sup>3</sup>/day이었는데, 비초과확률 98%를 적용할 경우, 1일 최소 및 최대 급수량은 각각 42,394 m<sup>3</sup>/day과 52,931 m<sup>3</sup>/day이다. 비초과확률 개념을 사용한 것은 이상 자료에 의한 영향을 줄이기 위함이다. 갈수기에 1일 최소급수량으로 시민들에게 물을 공급할 경우, 1일 평균급수량을 기준으로 약 12.7%의 수량(5,392톤/일) 절감이 되는 것이다. 1일 최대급수량을 기준으로 한다면 약 23.5%의 수량(약 10,537톤/일) 절감이 가능하게 된다. 이러한 절감 비율은 제한급수 1단계(관심 단계)의 목표 절감 범위인 10 ~ 30%에 대비가 가능한 수치이다. 따라서, 1일 최소급수량 공급을 통해 1단계(관심단계) 수준의 가뭄 상황 발생 시 대비가 가능할 것이다.

수도사업자의 1일 급수량 분포 자료가 없다면, 첨두부하를 이용하여 분석할 수 있다. 첨두부하는 1년 중 가장 많이 물을 사용하는 날의 급수량(i.e., 1일 최

**Fig. 2.** Analyzing daily water supply of whole year.

대급수량)을 1일 평균급수량으로 나눈 값이며, 우리나라에서 급수시스템의 상수도 시설을 설계할 때 기준으로 사용된다. 어떤 도시의 급수인구가 7~10만이라면 Table 3에 따라 첨두부하 계수는 1.4787이다. 이 도시의 첨두부하를 고려한 1일 평균급수량과 1일 최대급수량의 비는 68%(=1/1.4787)이므로, 1일 최대급수량 대비 32%를 감량하여도 시민들은 1일 평균급수량 수준에서 물을 공급받는 것이므로, 이 정도의 급수가 유지된다면 생활의 불편은 크지 않을 것이다. 1일 최대급수량 대비 약 32%의 절감으로 Table 1의 1단계(관심단계)에 대한 대응이 가능하다. 또한, 1일 최소급수량을 공급하여도 시민들의 생활에 불편은 있겠지만 기본적인 생활은 가능할 것이므로, 수도사업자는 상당량의 급수량 절감이 가능하며 갈수기를 위한 계획 마련에 참고할 수 있을 것이다.

Table 4와 Table 5에 따르면 1일 최대, 최소 및 평균급수량은 각 지자체별로 급수인구 등에 따라 차이가 존재한다. 최대 및 최소급수량을 결정하기 위해 확률밀도함수에서 비초과확률이 90%와 98%로 다른 경우의 예를 들었는데, 이는 각 수도사업자가 수도관련 계획 수립시 다양한 수치를 사용하기 때문이다. 각 도시들의 1일 최대급수량과 1일 최소급수량의 비율을 검토한 결과에 따르면, 각 도시들은 약 7~21% 수준의

공급 여유를 가지고 있는 것으로 조사되었다. 갈수기가 오면 1일 최대 급수량 대비 7~21% 수준으로 줄여서 급수하여도 1일 최소급수량 수준의 용수공급이므로, 시민들이 물절약에 대한 의지가 있으면 해당 급수 구역에서 합리적으로 적용 가능한 급수량이라고 판단된다. 원활한 제한급수의 시행과 민원의 최소화를 위해 해당 내용을 주민들에게 사전에 알리고 협조를 구하는 것도 필요할 것이다.

Fig. 3와 Fig. 4는 각각 비초과확률 90%와 98%에서 인구에 따른 1일 최대 및 최소급수량을 급수인구에 대한 함수로 그려본 것이다. 이 그림에서 회귀분석을 통해 급수인구에 대한 지수함수로 일반식을 만드는 것도 가능하다. 각 수도사업자는 실제 1일 급수량 자료를 바탕으로, 1일 최대 및 최소급수량을 구하는 것이 원칙이지만, 자료를 구하기 어려운 경우는 제시된 Eq. 1과 Eq. 2를 사용하는 것도 가능할 것이다. Eq. 1와 Eq. 2는 각각 비초과확률 90%와 98%에서 급수인구에 따른 1일 최대 및 최소급수량의 차이를 구하는

식이다. 이 식에서  $x$ 는 급수인구이다.

$$\begin{aligned} \text{1일 급수량 차이 (m}^3\text{/d)} &= & \text{(Eq. 1)} \\ \text{1일 평균급수량} \times (1.2441 \times x^{-0.011} - 0.757 \times x^{0.0142}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{1일 급수량 차이 (m}^3\text{/d)} &= & \text{(Eq. 2)} \\ \text{1일 평균급수량} \times (1.4104 \times x^{-0.019} - 0.6727 \times x^{0.0207}) \end{aligned}$$

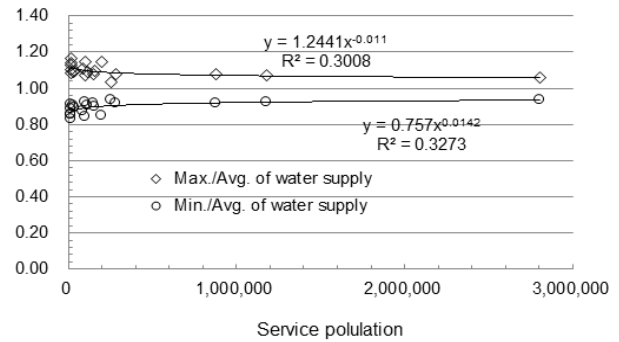


Fig. 3. Maximum and minimum water supply over population with non-exceedance probability of 90%.

Table 4. Average, maximum, and minimum water supply of major cities of South Korea with non-exceedance probability of 90%

City	Service Population	Avg. Water Supply (m <sup>3</sup> /d)	Max. Water Supply (m <sup>3</sup> /d)	Min. Water Supply (m <sup>3</sup> /d)	Max./Avg.	Min./Avg.	Avg./Min.
Seoul	10,388,055	3,217,209	3,435,130	2,991,087	1.07	0.93	1.08
Incheon	2,806,943	961,734	1,018,058	900,293	1.06	0.94	1.07
Suwon	1,178,509	333,282	356,952	308,099	1.07	0.92	1.08
Bucheon	880,907	265,210	285,732	243,349	1.08	0.92	1.09
Paju	281,807	146,788	158,125	134,599	1.08	0.92	1.09
Gwangju	255,779	92,437	95,682	86,332	1.04	0.93	1.07
Yangju	199,143	74,420	85,231	63,067	1.15	0.85	1.18
Euwang	160,700	48,204	52,806	43,279	1.10	0.90	1.11
Susan	147,185	47,783	51,425	43,897	1.08	0.92	1.09
Jungup	115,840	36,237	39,439	32,704	1.09	0.90	1.11
Dongduchun	99,228	31,792	36,450	26,685	1.15	0.84	1.19
Nonsan	98,910	29,037	31,124	26,760	1.07	0.92	1.09
Eumsung	84,916	26,148	29,090	22,849	1.11	0.87	1.14
Kumsan	40,087	16,186	17,803	14,446	1.10	0.89	1.12
Yecheon	33,575	12,606	13,715	11,433	1.09	0.91	1.10
Danyang	20,047	10,325	12,010	8,561	1.16	0.83	1.21
Bongwha	18,888	8,601	9,493	7,620	1.10	0.89	1.13
Muju	16,915	11,794	13,435	10,059	1.14	0.85	1.17
Boun	16,174	6,262	7,057	5,338	1.13	0.85	1.17
Goryung	14,022	5,800	6,283	5,268	1.08	0.91	1.10



pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

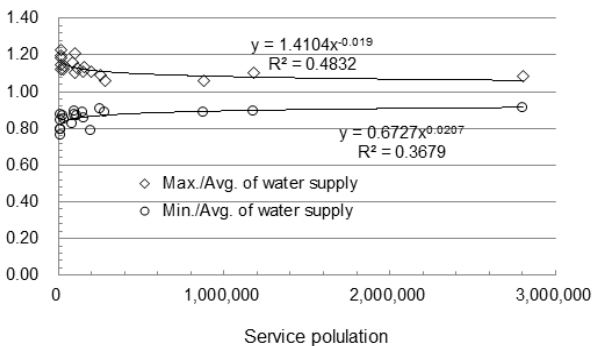
pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

**Table 5.** Average, maximum, and minimum water supply of major cities of South Korea with non-exceedance probability of 98%

City	Service Population	Avg. Water Supply (m <sup>3</sup> /d)	Max. Water Supply (m <sup>3</sup> /d)	Min. Water Supply (m <sup>3</sup> /d)	Max. / Avg.	Min. / Avg.	Avg. / Min.
Seoul	10,388,055	3,217,209	3,522,843	2,897,892	1.09	0.90	1.11
Incheon	2,806,943	961,734	1,041,612	876,740	1.08	0.91	1.10
Suwon	1,178,509	333,282	366,922	298,129	1.10	0.89	1.12
Bucheon	880,907	265,210	281,023	234,603	1.06	0.88	1.13
Paju	281,807	146,788	155,552	129,820	1.06	0.88	1.13
Gwangju	255,779	92,437	100,669	83,839	1.09	0.91	1.10
Yangju	199,143	74,420	82,734	58,385	1.11	0.78	1.27
Euwang	160,700	48,204	54,751	41,334	1.14	0.86	1.17
Susan	147,185	47,783	52,931	42,391	1.11	0.89	1.13
Jungup	115,840	36,237	40,923	31,334	1.13	0.86	1.16
Dongduchun	99,228	31,792	38,493	27,821	1.21	0.88	1.14
Nonsan	98,910	29,037	32,043	25,918	1.10	0.89	1.12
Eumsung	84,916	26,148	30,396	21,543	1.16	0.82	1.21
Kumsan	40,087	16,186	18,496	13,753	1.14	0.85	1.18
Yecheon	33,575	12,606	14,172	10,939	1.12	0.87	1.15
Danyang	20,047	10,325	12,690	7,881	1.23	0.76	1.31
Bongwha	18,888	8,601	9,883	7,230	1.15	0.84	1.19
Muju	16,915	11,794	14,145	9,348	1.20	0.79	1.26
Boun	16,174	6,262	7,415	4,980	1.18	0.80	1.26
Goryung	14,022	5,800	6,507	5,065	1.12	0.87	1.15



**Fig. 4.** Maximum and minimum water supply over population with non-exceedance probability of 98%.

### 3.2 시뮬레이션을 이용한 가뭄단계별 감압밸브에 의한 제한급수 검토

제한급수를 시행하는 2가지 방법 중에서 감압밸브에 의한 방법은 해당 블록의 고지대에서는 압력이 낮아 수도꼭지에서 물이 나오지 않는 불편함이 있지만, 관망의 압력이 낮으므로 누수가 줄어드는 장점이 있다. 감압밸

브에 의한 제한급수는 상대적으로 고지대에서는 물이 나오지 않기 때문에 제한급수 전에 단수의 범위가 어느 정도인지 파악해야 하고, 단수 대상 주민들에 대한 물공급 특별 대책을 수립하여야 한다. 만약 단수지역이 광범위하고, 대체 물공급 방법이 적용 불가능하다면 시간급수 방식에 의한 제한급수를 고려해야 할 것이다. 이를 사전에 검토하기 위해서 시뮬레이션이 필수적이다. 이 시뮬레이션을 통해 급수가 되지 않는 절점(Node)과 압력이 낮은 절점을 확인하는 것이 가능하기 때문이다. 이러한 절점에는 수도사업자가 booster pump를 설치하거나 물차와 생수를 별도로 공급하는 것이 필요하며, 만약 불가능한 경우에는 감압에 의한 급수제한을 시행하면 많은 민원이 발생할 것이다. 대책 수립의 예를 보여 주기 위해 ○○시 6개 배수구역 중에서 CR 배수구역을 대상으로 감압에 의한 제한급수를 WaterGEMS을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 1단계 관심단계(제한율 10%)를 모의한 결과, 53개 절점에서 물부족이 발생하였다. 2단계 주의단계(제한율 30%)를 모의한 결과, 103개 절점에서

Drought Stage Classification	Stage 1 (Abnormally Dry, Blue)	Stage 2 (Moderate Drought, Yellow)	Stage 3 (Severe Drought, Orange)				
Usual Supply	Reducing less than 10~30%	Reducing less than 30~50%	Reducing less than 50%				
631 m <sup>3</sup> /day	568 m <sup>3</sup> /day	442 m <sup>3</sup> /day	316 m <sup>3</sup> /day				
Water Supply Deficit Nodes (red color)							
0 nodes	2 nodes	5 nodes	17 nodes				
Pressure Deficit Nodes (green and red color)							
Pressure less than 150 psi (It could not supply water up to the 2nd floor.)							
2 nodes	11 nodes	19 nodes	54 nodes				
Number of service outage							
0 nodes	2 nodes	4 nodes	21 nodes				
● (nodes)	●	●	●				
Deficit	0	0	> 1 m <sup>3</sup>	Flow direction	Water reservoir	Pipe (link)	Pressure release valve
Pressure	0-150 psi	> 150 psi	Negative Pressure				

Fig. 5. Results of demand deficit by nodes using WaterGEMS simulation.

물부족이 발생하였다. 3단계 경계단계(제한율 50%)를 모의 한 결과, 121개 절점에서 물부족이 발생하였다. 아래 Fig. 5은 각 단계에서 시뮬레이션한 결과들이다. 이 결과를 통해 제한급수에 따라 수도물을 공급받지 못하는 지역과 필요한 양을 함께 예측할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 CR 배수구역의 주의단계에서 감압에 의해 30%를 줄여 제한 급수하는 시뮬레이션 결과이다. 급수량이 부족하거나 압력이 낮아 지원이 필요한 문제 절점을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 수도사업자는 booster pump, 병물, 급수차의 용량에 따른 동원비용, 출동거리, 운영시간 등을 고려하

여 사전에 지원계획을 수립할 수 있을 것이다. Fig. 6에서 보이는 붉은 점은 수도물이 부족한 절점(Node)이다. 이 절점에서 필요한 용수량은 분모에 나타내었으며, 부족한 용수량은 분자에 있다. 예를 들어, Location 5에서는 필요한 용수량 11 m<sup>3</sup>/day 중에서 7 m<sup>3</sup>/day만 공급받게 되어 4 m<sup>3</sup>/day의 물부족이 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 급수량이 부족한 절점, 부족한 양 및 그 지역의 압력을 정량화 할 수 있으므로, 이를 이용하여 Table 6의 예와 같은 갈수기 급수대책 마련에 활용할 수 있다.

상수도설계기준에서 2층 건물에의 직결급수를 가능





pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

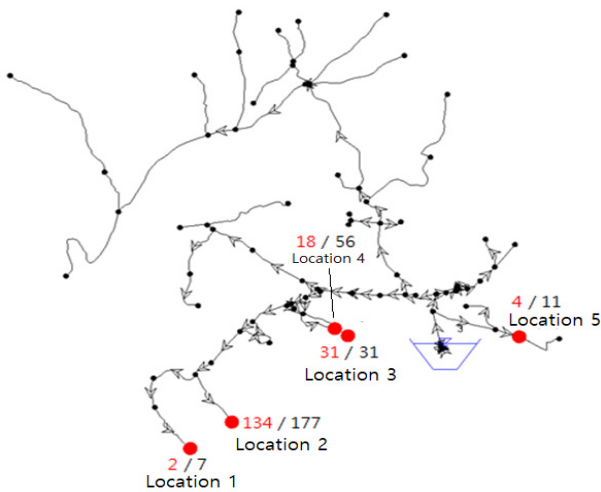
pp. 345-356

pp. 357-371

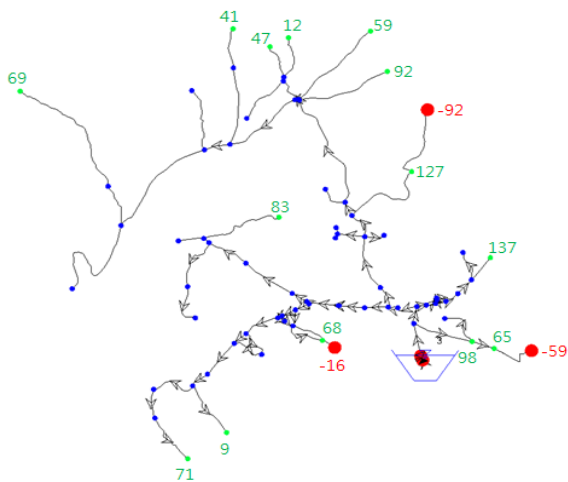
pp. 373-383

**Table 6.** Alternative water supply for five locations(nodes) with Stage 3 drought

Classification	Location 1	Location 2	Location 3	Location 4	Location 5
Water Deficit [m <sup>3</sup> /day]	2.0	134.0	31.0	18.0	4.0
5 ton(m <sup>3</sup> ) water truck	-	20	5	3	-
2.5 ton(m <sup>3</sup> ) water truck	1	13	2	1	1
Bottled Water	-	1.5 m <sup>3</sup> 1.5 L×1000	1 m <sup>3</sup> 1 L×1000개	0.5 m <sup>3</sup> 1 L×500	1.5 m <sup>3</sup> 1.5 L×1000
Remarks	-	Booster pump is required	Booster pump is required	Booster pump is required	-



**Fig. 6.** Water deficit (red color) / water demand (black color) at five red-colored nodes by reducing 30% of water supply (unit: m<sup>3</sup>/day).



**Fig. 7.** Water pressures at nodes by reducing 30% of water supply (unit: psi).

하계 하기 위한 배수관의 최소동수압을 150~200 kPa 정도로 정하고 있다 (Ministry of Environment, 2017). Fig. 7에서 초록색으로 표시한 14개 지역은 압력이 0~150 kPa 정도로 2층 이상 수용가에 직결급수가 제한되며, 빨간색으로 표시한 3개 지역(부압 판정)에서는 정상적인 물 공급에 차질이 생길 수 있게 된다. 이처럼 절점에서의 압력 검토는 출수불량 확인 및 단수 예측에 객관적인 자료로 활용될 수 있다.

#### 4. 결 론

갈수기에 효율적으로 수돗물을 공급하기 위한 계획 수립을 위해 수도사업자는 제한급수 전략을 수립해야 한다. 수도사업자는 연간 1일 급수량의 분포나 침투부하를 통해 1일 최대, 최소 및 평균급수량을 분석하여, 가뭄 1단계(관심기)의 용수공급 전략에 활용할 수 있다. 갈수기에는 특히 1일 최소급수량에 주목하여야 하는데, 이 양을 공급하여도, 시민들의 생활에 불편은 있지만, 기본적인 생활은 가능하기 때문이다. 한국의 주요 도시들의 1일 최대 및 최소 급수량을 분석한 결과에 따르면, 각 도시들은 갈수기에 최소급수량으로 공급한다면 최대 급수량 대비 약 7~21% 수준의 공급 여유를 가지고 있는 것으로 조사되었다.

갈수기 제한급수 방법 중에서 감압에 의한 제한급수 방식을 이용하는 경우, 고지대에서는 압력이 낮아 물이 나오지 않는 불편함이 생길 수 있지만, 유수율이 낮은 저지대에서는 높은 압력 때문에 관망에서 누수되는 상당한 물을 아낄 수 있고, 시간 급수의 단점을 피할 수 있다. CR 급수구역을 대상으로 WaterGEMS를 이용하여

감압급수를 시뮬레이션하여, 각 절점에서의 부족한 수돗물의 양, 압력 부족 등을 예측하여 이를 기반으로 용수가 부족한 절점에서 booster pump의 설치나 물차와 생수를 특별 공급하는 계획을 만들 수 있었다. 이러한 특별공급계획이 부족하다면, 감압에 의해 단수가 되는 지역에서는 민원발생이 예상되므로, 감압급수를 적용하려고 하는 수도사업자는 두가지 방법(감압 및 시간급수)을 신중히 고려하여 결정하여야 한다.

## References

- Ang, W.K. and Jowitt, P.W. (2006). Solution for Water Distribution Systems under Pressure-Deficient Conditions, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 132(3), 175-182.
- AWWA. (2019). M60 Drought preparedness and response, 2<sup>nd</sup> Ed., Denver Co. USA.
- Baek, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2007). Development of HSPDA Model for Water Distribution System under Abnormal Operating Condition, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 27(5B), 475-488.
- Bentley. (2017). WaterGEMS V8i user's manual, Exton, PA., United States.
- Charalambous, C.N. (2001). Water management under drought conditions, *Desalination*, 138, 3-6.
- Kim, J.H. (2005). Study on Runoff Coefficient Estimation of Rational Method in the Korean River Basins, Doctorate thesis, Hongik University, Seoul, Korea, 3-7.
- Kim, T.W., and Park, D.H. (2015a). Extreme drought response and improvement: focusing on 2015 drought, special feature 2, *Magazine Korean Soc. Civ. Eng.*, 63(9).
- Kim, K.P., Park, Y.G., and Koo, J.Y. (2015b). Optimal design methodology of district metered area utilizing geographic information system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 29(2), 223-231.
- K-water. (2016). Drought overcoming white paper(centering on the Chungnam-west area), 1, 15-26.
- Korea Meteorological Administration. (2017). Wether information, <http://www.kma.go.kr/index.jsp> (August 25, 2017).
- Lee, T.K., Chae, S.H., Kim, S.S., Seo, I.S., Kim, J.H., and Park, N.S. (2012). Establishment of methodology for estimating an emergency water, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 26(3), 361-372.
- MOLIT (Ministry of Land Infrastructure and Transport). (2015). Han River Flood Control Office, real time forecasting data of minimum stream flow in major dam, <http://www.hrfco.go.kr/sumun/damList.do> (August 20, 2017).
- Ministry of the Interior and Safety, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, Ministry of Environment, and Ministry of Land Infrastructure and Transport. (2015). Drought Disaster Crisis Management Standard Manual, 1, 19-34.
- Ministry of Environment. (2017). Korean Design Standard KDS 57 65 00, 198.
- Ministry of Environment. (2016). Establishment of water supply guideline for evaluation and limitation of drought vulnerability, 1, 37-66.
- Oak, S.Y., Baek, S.C., Lee, H.M., and Jun, H.D. (2018). 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.*, 18(2), 231-237.
- Ravi, S.C., Renganathan, N.T., Perumal, S., and Paez, D. (2019). Analysis of water distribution network under pressure-deficient conditions through emitter setting, *Drink. Water Eng. Sci.*, 12, 1-13.
- Rossman, L., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., and Haxton, T. (2020). EPANET 2.2 User Manual. USEPA/600/R-20/133, Washington, DC.
- Shih, J.S., and ReVelle, C. (1995). Water supply operations during drought: A discrete hedging rule, *Eur. J. Oper. Res.*, 82, 163-175.
- Świtnicka, K., Suchorab, P., and Kowalska, B. (2017). "The optimization of a water distribution system using Bentley WaterGEMS software", *International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17)*, 15, December 2017, Lublin, Poland.
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1998). Water distribution reliability: Simulation methods, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 114(3), 276-294.
- Wu, Z.Y. and Walski, T. (2006). "Pressure Dependent Hydraulic Modelling for Water Distribution Systems under Abnormal Conditions", *IWA World Water Congress and Exhibition*, 10-14 September, 2006, Beijing, China.
- Yang, K.S., Kim, D.H., Jung, K.S., and Kim, J.H. (2014). Characteristics and control of intermittent flow in water distribution systems due to restricted supply, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 28(1), 1-11.