

# SWAT 모형을 이용한 상수도 취수원의 가뭄 예측 및 확산 연구

최정렬\* · 조현재\*\* · 라다혜\*\*\* · 김지태\*\*\*\*

Choi, Jung Ryel\*, Jo, Hyun Jae\*\*, La, Da Hye\*\*\*, Kim, Ji Tae\*\*\*\*

## A Study on Drought Prediction and Diffusion of Water Supply Intake Source Using SWAT Model

### ABSTRACT

Most of the water supply facilities that use rivers as sources do not have monitoring facilities such as precipitation and stream flow measurement, and there is no judgment standard for drought response such as water intake control in river flow during dry season. In addition, it was confirmed that local government officials, who deal with actual drought work, have limitations in applying the drought index (SPI, PDSI, etc.) and diffusion models that have been proposed so far in advance. Therefore, in this study, the drought prediction system was constructed to determine the number of water-intake available days using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) and the water supply network from the intake source to the beneficiary area, suggesting the drought spreading time and space.

**Key words** : Drought, The number of water-intake available days, Drought prediction system, SWAT

### 초록

하천을 수원으로 하는 상수도 시설은 강수량 및 하천 유량과 같은 모니터링 설비가 없는 곳이 대부분이며, 갈수기 등 하천 유량 감소기에도 취수량 조절과 같은 가뭄대응을 위한 판단 기준이 없어 사전 대응이 곤란한 실정이다. 또한, 실제 가뭄 업무를 일선에서 처리하는 지자체 공무원 등이 지금까지 제시된 가뭄지수(SPI, PDSI 등) 및 확산 모델 등을 사전 대응에 활용하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 장기유출모형(SWAT)의 매개변수 검·보정을 통해 장기간의 일단위 유출량을 추정하였으며, 감수곡선식을 도출하였다. 또한, 일단위 취수량과 감수곡선식의 관계분석을 통해 취수가능일수를 정량적으로 산정하였으며, 이를 용수공급 네트워크에 대입하여 읍면동 단위 적용 가능 범위를 제시하였다.

**검색어** : 가뭄, 취수가능일수, 가뭄 예측 체계, SWAT

## 1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화는 우리나라 강수의 시공간적 변동성을 증가시켰으며, 이로 인해 강수량, 유출량 및 증발산량이 변화하여 예외적이고 발생 가능성이 없어 보이던 극한가뭄의 발생 가능성이 커지고 있다(Kim and Park, 2018; MOLIT, 2011). 국내에서 발생한 가뭄에 의한 피해를 살펴보면 2015년도에는 42년 만의 기록적인 가뭄으로 보령댐의 저수율이 약 19 %에 그치면서 충청남도 8개 시군에 제한급수를 시행하였으며, 2017년도에는 7년 만의 최악의 가뭄으로 속초시에서는 28일 동안 제한급수를 시행하여 국민의 불편과 피해가

\* 정희원 · (주)에스디엠이엔씨 연구원 (SDM ENC Co. · [lovekurt82@gmail.com](mailto:lovekurt82@gmail.com))

\*\* 정희원 · (주)에스디엠이엔씨 연구원 (SDM ENC Co. · [whguswo923@naver.com](mailto:whguswo923@naver.com))

\*\*\* (주)에스디엠이엔씨 연구원 (SDM ENC Co. · [unooun@hanmail.net](mailto:unooun@hanmail.net))

\*\*\*\* 교신저자 · (주)에스디엠이엔씨 대표 (Corresponding Author · SDM ENC Co. · [jtkim77777@hanmail.net](mailto:jtkim77777@hanmail.net))

Received November 1, 2019/ revised November 12, 2019/ accepted November 15, 2019

켰던 것으로 조사되었다(NDMI, 2017; NDMI, 2018).

정부에서는 가뭄 피해에 대응하기 위하여 2016년 3월부터 부처별 통합 가뭄 예·경보를 시행하고 있으며, 기상, 농업용수, 생·공용수 가뭄 등으로 나누어 1~3개월 후의 가뭄 전망을 발표하고 있다(NDMI, 2017). 이때, 기상 가뭄은 평년 누적 강수량 비교를 통해 판단하며, 농업용수 가뭄은 평년 저수를 비교를 통해, 생·공용수 가뭄은 하천·댐의 수위, 유량 등을 기준으로 가뭄 상황을 판단한다.

가뭄 예측과 관련하여 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 팔머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 수정 지표수 공급지수(Mdified SWS, MSWSI) 및 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)의 가뭄 관련 지수가 제시되었으며, 이를 활용하여 가뭄 취약성 평가와 피해개선 방안 및 가뭄 대책 수립에 관한 많은 연구가 진행되고 있다(Kim and Lee, 2011). 또한, 가뭄 확산과 관련하여 미육군 공병단에서 개발된 공영시각모델(Shared Vision Model, SVW)이 수자원관리 분야에서 적용되고 있으며(Jeong et al., 2004), 미국 워싱턴(Washington)주 타코마(Tacoma) 지역의 가뭄관리 계획의 수립을 위해서 공영시각모델 중 하나인 STELLA (System Thinking Experiential Learning Laboratory With Animation, High Performance System)를 활용하여 가뭄관리 시스템을 구축한 바 있다(Palmer et al., 1993). 국내에서는 용수수급의 안정성 분석과 수문학적 가뭄지수인 수정

지표수 공급지수(MSWSI)값과 저수지 유입량과의 연계를 통한 가상가뭄모의운영(Virtual Drought Exercise, VED)을 활용한 방법 등이 적용된바 있다(Seo et al., 2008).

그러나 하천을 수원으로 하는 상수도 시설은 강수량 및 하천 유량 등 모니터링 설비가 없는 곳이 대부분이며, 하천 유량 감소기에 도 취수량 조절과 같은 가뭄대응을 위한 판단 기준이 없어 사전 대응이 곤란한 실정이다(MOE, 2017). 또한, 실제 가뭄 업무를 일선에서 처리하는 지자체 공무원 등이 지금까지 제시된 가뭄지수 및 확산 모델 등을 사전 대응에 활용하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 장기유출모델을 이용하여 취수원의 가용수자원 및 취수가능일수를 판단할 수 있는 가뭄 예측체계를 구축하고, 이를 취수원으로부터 수혜지역까지의 용수공급 네트워크를 통해 확장하여 공간적 가뭄 확산 범위를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 시범지역 선정

본 연구에서는 시범지역 선정을 위해 2단계의 현황조사를 실시하였다. 1차 조사는 도면조사로 전국의 상수도를 기준으로 유량이 풍부한 지역, 군사지역, 섬 지역을 제외하였다. 2차 조사는 담당자와의 우선 통화를 통하여 광역상수도 여부, 건천 여부(갈수기), 수위

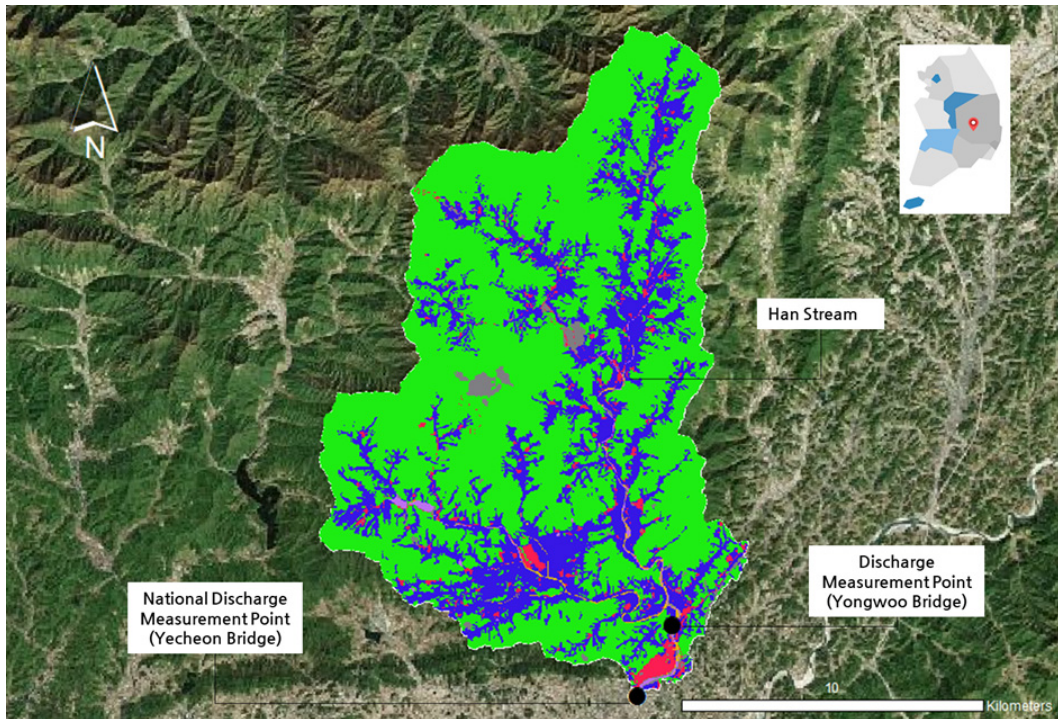


Fig. 1. Study Area (Yecheon Water Intake Facilities)

Table 1. Information of Yecheon Water Intake Facilities

Name	Address	Facility capacity (m <sup>3</sup> /day)	Source water Type	Wide area water supply	Measuring instrument	Dry stream (drought period)	Emergency phase
Yecheon Water-intake station	Yecheon-eup, Yecheon-gun, Gyeongbuk,	10,800	River-bed water	X	X	X	Attention

Table 2. Information from a Weather Station Near a Pilot Area

Name	Competent Authority	Latitude	Longitude	Height above sea level (m)
Yeongju (272)	Korea Meteorological Administration	36.87	128.52	210.79
Mungyeong (273)	Korea Meteorological Administration	36.63	128.15	171.80
Andong (136)	Korea Meteorological Administration	36.57	128.71	140.10
Yecheon	Ministry of Land, Infrastructure and Transport	36.65	128.45	81.09

계측 여부 등을 확인하였으며, 두 가지 조건을 모두 충족하고 있는 예천취수장(한천)을 대상 지역으로 선정하였다(Fig. 1 참고).

대상 지역인 예천취수장의 경우 환경부의 가뭄 단계 조사시 관심 단계였으며, 계측기 설치 여부, 갈수기 건천 여부 등 본 연구과제에 적합한 지역으로 나타났다. 조사 결과는 다음 Table 1과 같다.

### 2.2 기초자료 수집

본 연구에 활용된 SWAT은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research. Service, ARS)에서 개발된 준분포형 모형이며, 장기간의 연속적인 모의 유량을 생성하기 위해 인위적인 토지이용 상태나 수문환경 변화에 따른 유출을 고려할 수 있는 복합적인 수자원 관리 모형이다(Arnold and Fohrer, 2005). SWAT은 대상유역에 해당하는 항뚝(증발산, 지표유출, 강수, 기저 유출 등)에 대하여 각 수문반응 단위별로 계산할 수 있으며, SWAT에서 활용되는 방정식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{\iota=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - \omega_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

이때,  $SW_t$ 는 최종의 토양수분량(mm),  $SW_0$ 는  $\iota$ 일의 초기토양 수분량(mm),  $t$ 는 시간(일),  $R_{day}$ 는  $\iota$ 일의 강수량(mm),  $Q_{surf}$ 는  $\iota$ 일의 지표유출량(mm),  $E_a$ 는  $\iota$ 일의 증발산량(mm),  $\omega_{seep}$ 는  $\iota$ 일의 토양면으로부터 투수층으로 투수되는 총량(mm),  $Q_{gw}$ 는  $\iota$ 일의 회귀수량(mm)이다.

장기유출모형인 SWAT의 입력자료 중 기상자료는 대상 유역내 인접한 영주, 문경, 안동 기상대의 일최고 기온(°C), 일최저 기온(°C), 일강수량(mm), 평균습도(%), 일조합(hr), 평균풍속(m/s) 및 일사량(MJ/m<sup>2</sup>/day) 자료를 2007.01.01.~2017.05.01.까지 기상청 국가기후데이터센터에서 수집하였으며, 유출량 자료는 국토교

통부 예천 관측소의 동일 기간 자료를 수집하였다(Table 2 참고).

SWAT의 유역 분할을 위해 5 m의 고해상도 고도자료(DEM)를 이용하였다. DEM으로부터 Fig. 2(a)와 같이 두 개 유역으로 나누었으며, 모형의 매개변수 최적화를 위하여 2번 유역의 출구점을 국토교통부 예천 관측지점으로 설정하였다. 최적화된 모형의 매개변수는 본 과제에서 구축한 수위 계측기 설치 지점을 1번 유역의 출구점으로 설정하여 모형 검증에 사용하였다.

대상유역의 지형자료는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀도양도를 이용하였으며, 토지이용도는 환경부 환경공간정보시스템에서 제공하는 1:25,000 해상도의 중분류 토지피복도를 SWAT에 맞는 코드로 재분류하여 사용하였다.

### 2.3 장기유출모형 매개변수 보정

SWAT과 같은 장기 유출 모형의 보정을 위해서는 지속적이고 장기적인 유량 측정 자료가 필요하므로 본 연구에서는 대상지점 하류에 있는 국토교통부 예천 관측지점의 10년간(2007~2016)의 유량 측정 자료를 검토하였으며, 갈수기의 결측치 여부를 분석하여 유량자료의 신뢰성이 높다고 판단되는 2007년 및 2011년의 자료를 이용하여 매개변수를 보정하였다.

모형의 매개변수 보정 방법에는 수동 및 자동 보정 방법론이 있으며, 수동보정 방법은 시행착오법을 이용한 보정으로 모형의 매개변수를 계속적으로 변화시켜주는 방법론이며 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 목적함수를 최소화하는 자동 보정 방법의 하나인 최적화 기법을 이용하여 매개변수를 보정하였다. 이때 국내외 연구보고서 및 SWAT 매뉴얼 상에 높은 민감도를 보이는 유출곡선지수(CN2), 증발보상계수(ESCO), 토양유효수분량(SOL\_AWC), 대수층의 침투수분량(GW\_REVAP) 4가지 매개변수를 주요 변수로 설정하여 Table 3과 같이 보정하였다.

SWAT의 매개변수 보정 값과 실측 유출량 값을 비교해본 결과 2007년의 결정계수(Coefficient of determination, R<sup>2</sup>)는 0.71,

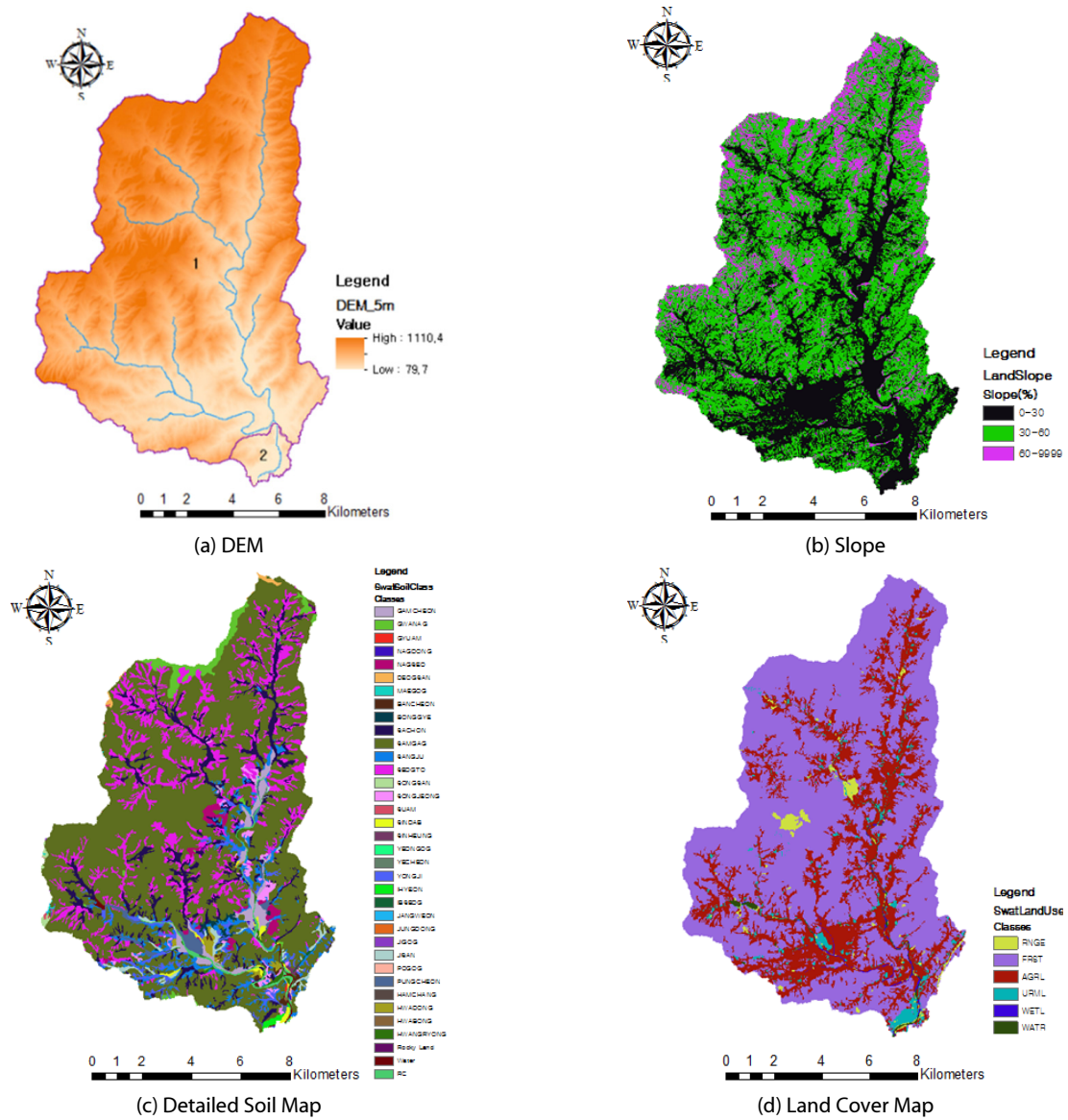


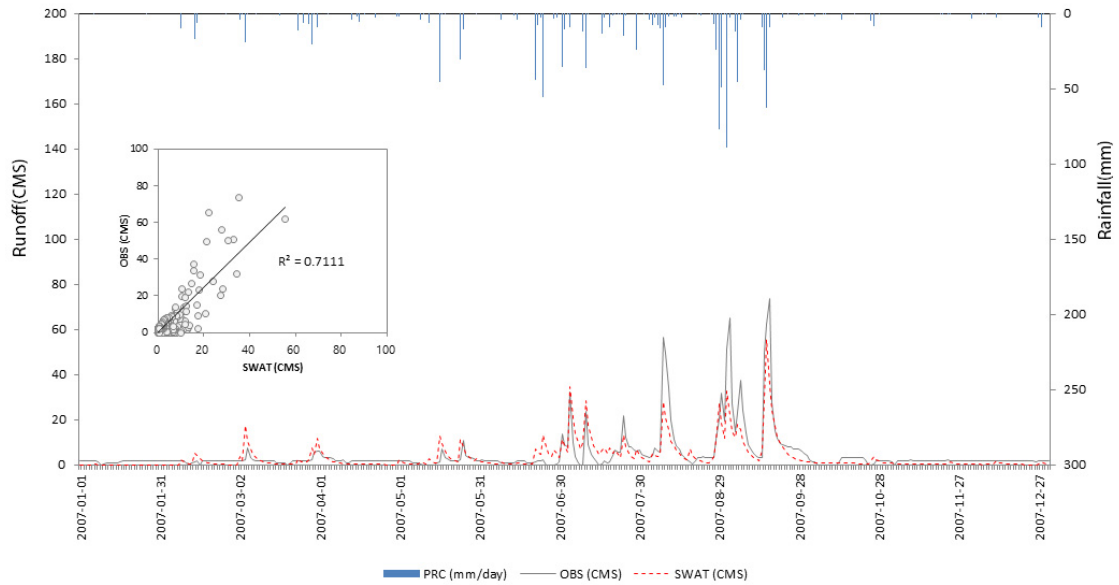
Fig. 2. SWAT Model Topographical Data

Table 3. Parameters in the SWAT Model Used

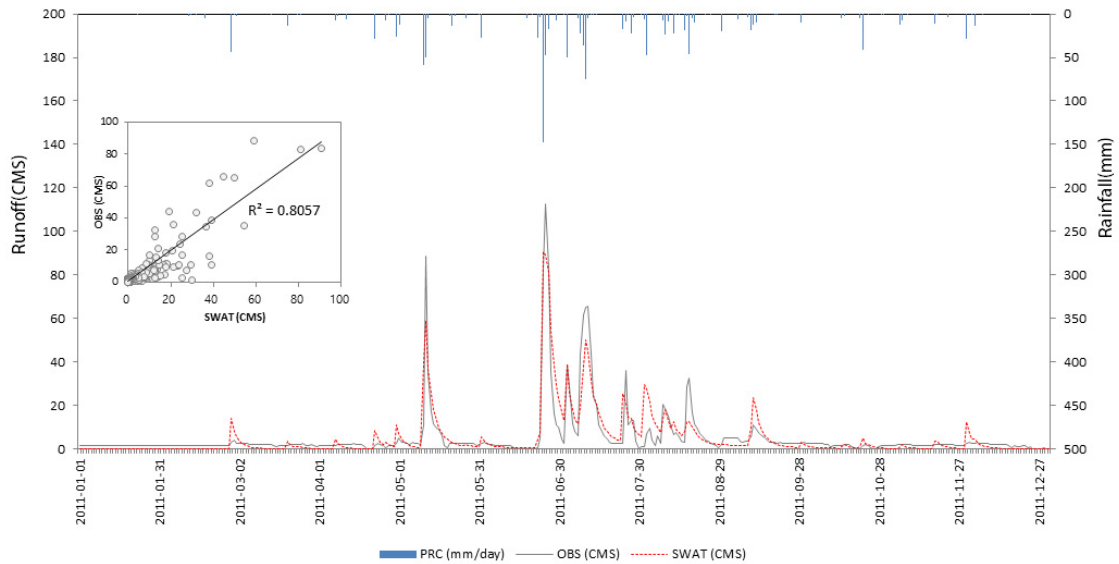
Parameter	Min-Max	Parameter correction
CN2	-25-25	-25
ESCO	0-1	1
SOL_AWC	-25-25	25
GW_REVAP	0.02-0.2	0.02

NSE (Nash and Sutcliffe Efficiency, NSE)는 0.67로 나타났으며, 2011년의 결정계수는 0.81, NSE는 0.8로 나타났다. 시범유역의 연도별 도식적 평가는 앞선 통계적 평가 결과를 바탕으로 수행하였으며, Fig. 3은 연도별 강수량, 모형 결과 및 실측값을 도식화한

결과이다. 그래프를 살펴보면 모형의 결과는 강우에 따른 피크 값의 경향을 유사하게 모의하고 있는 것으로 나타났으며, 실측값의 경향성을 잘 따라가고 있는 것을 확인하였다.



(a) Calibration Results (2007.1.1. - 2007.12.31.)



(a) Calibration Results (2011.1.1. - 2011.12.31.)

Fig. 3. SWAT Calibration Results of Yecheon Water-Intake Basin

## 2.4 장기유출모형 매개변수 검증

보정된 모형의 매개변수 값을 본 연구에서 구축한 용우교를 출구점으로 하는 한천(예천취수장) 유역에 대입하여 2016년 12월-2017년 4월까지 측정된 실측 유량 값을 비교하여 모형을 검증하였다(Fig. 4). 실제 유량 측정값을 보정된 모형 결과와 비교한 결과 결정계수( $R^2$ )가 0.99, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)가 3.11로 나타났으며, 장기유출모형의 결과 값이 양호한 것으로 분석되었다. 추후 실측 유량 자료의 표본 확충을 통해 지속적인 모형의 검증이 필요할 것으로 판단된다.

## 2.5 취수가능일수 산정

취수장의 취수가능량 및 취수가능일수를 산정하는 방법은 하천 수위 계측자료와 현장 유량 계측 자료를 바탕으로 수위-유량 곡선식이 만들어지면, 실시간 유량이 산정되고 장기유출모형(SWAT)으로부터 산출된 유량자료로부터 도출된 감수곡선에 대입해 취수가능일수가 산정된다. 대상지역에 설치된 수위계측기는 예천 취수장 집수정 상류 400 m 지점에 위치하고 있으며, 수위 계측기의 유량자료를 활용하여 상관관계를 분석하였다.

취수가능일수는 지하수 감수곡선법을 참고하여 유량에 대한

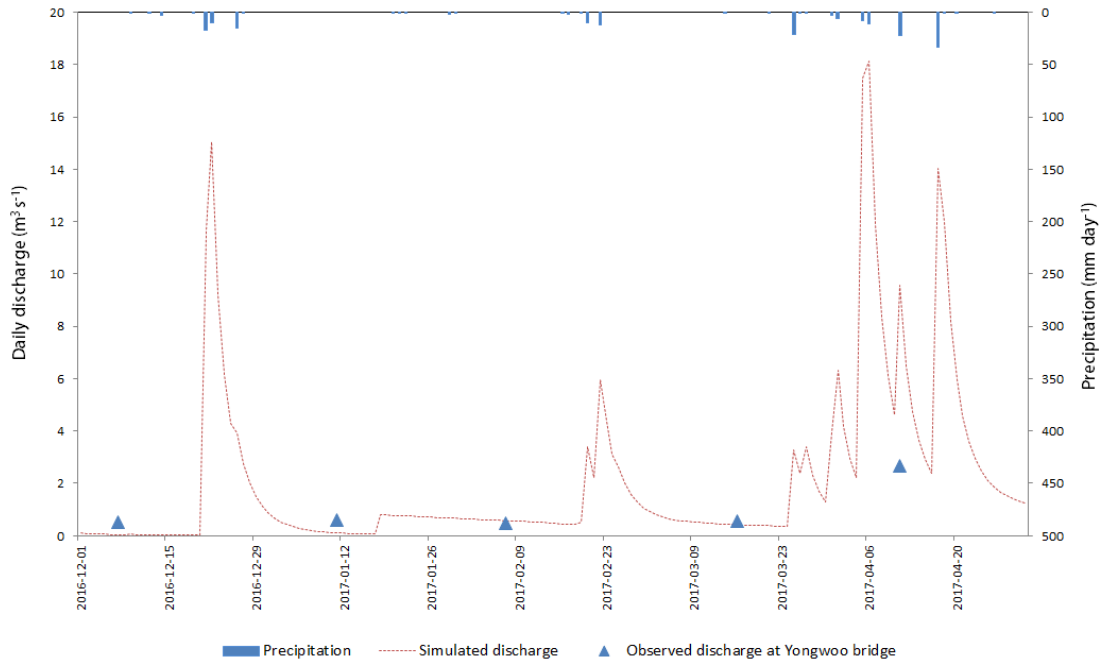


Fig. 4. SWAT Validation Results of Yecheon Water-Intake Basin

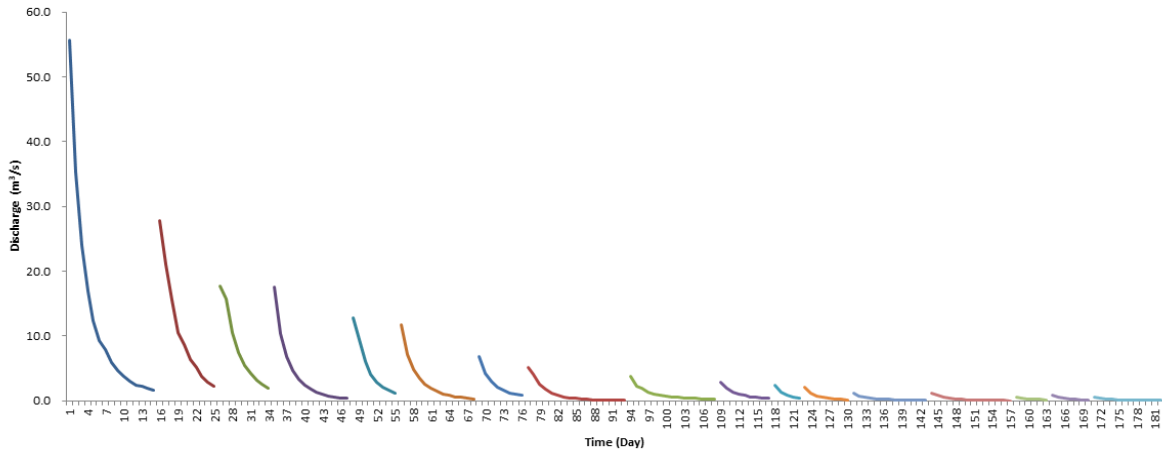


Fig. 5. Extraction of Discharge Reduction Curve

감수곡선을 산정하는 방식을 선택하였다. 감수곡선을 만들기 위하여 장기유출모형(SWAT)을 예천 대상지점에 적용하여 얻어진 2007년(결정계수=0.71), 2011년(결정계수=0.81)의 검·보정된 유량 결과에서 감수곡선들을 추출하였다(Fig. 5).

도출된 감수곡선들을 감수시간(일)을 바탕으로 재정리하였으며, 각 감수시간별 유량을 평균하여 감수곡선을 도출하였다(Fig. 6). 그래프 내의 심볼들은 Fig. 5에서 제시한 2007년과 2011년 전체 기간 각각의 감수곡선을 의미하며, 점선은 예천 취수장의 일평균 취수량을 의미한다. 분석 결과 예천 취수장의 일평균 취수량 (0.104 m<sup>3</sup>/s)이 감수곡선과 만나는 시간은 17.4일이며, 이 값을 예천

취수장에서 정상적으로 취수할 수 있는 한계 일수로 설정하였다.

Table 4는 2007년과 2011년 전체 기간의 감수곡선식의 평균값을 이용하여 산정된 결과이며, 추후 갈수기 등 특정 기간에 적용 가능성 평가가 필요하다. 추출된 감수곡선식을 특성 수위에 적용한 결과 한천의 현재 수위가 87.36 El.m일 때, 수위-유량 관계곡선을 이용하여 유량은 0.3 m<sup>3</sup>/s로 도출되며, 감수곡선에 대입했을 때 시간(일)은 16.4일로 도출되었다. 이때, 취수가능일수는 한계 일수인 17.4일에서 16.4일 차이인 1일이 된다. 이와 같은 방법으로 취수원인 한천의 수위 및 유량을 바탕으로 예천취수장의 취수가능 일수를 산정하였다(Table 5).

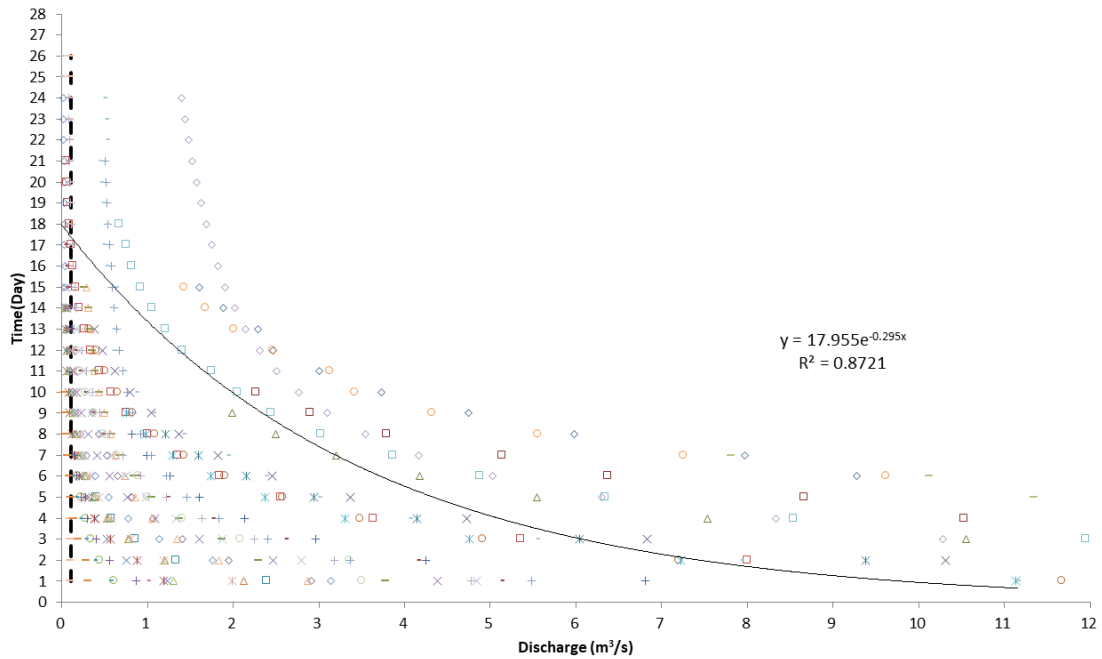


Fig. 6. Calculation of Discharge Reduction Curve Equation

Table 4. Discharge Reduction Curve Equation in Yecheon

Coefficient of Determination ( $R^2$ )	Discharge Reduction Curve Equation
0.87	$T = 17.955e^{-0.295Q}$

Table 5. Calculation results of Water Intake Possible Days in Yecheon

Water Level (EL.m)	Discharge ( $m^3/s$ )	Water Intake Possible Days
88.45	20.0	17.4
88.18	15.0	17.2
87.90	10.0	16.5
87.62	5.0	13.3
87.56	4.0	11.9
87.51	3.0	10.0
87.45	2.0	7.5
87.40	1.0	4.0
87.36	0.3	1.0

## 2.6 가뭄 확산 평가를 위한 용수 공급 네트워크 구축

수원을 기준으로 작성된 취수가능일수는 용수공급 네트워크에 따라 읍면동 단위 급수구역으로 확장되며, 이를 통해 급수구역의 가뭄 평가가 가능할 것으로 판단되었다. 본 절에서는 가뭄 확산 모형 구축을 위하여 시범지역을 경상북도 예천군으로 선정하고, 용수공급 네트워크를 구축하였다. 용수공급 네트워크는 수원(하천)의 급수계통도를 기준으로 작성하였으며, 각 읍면동별 급수인구에 따라 배분율을 산정하였다(Fig. 7). 배분율은 단일 배수지에서 단일

급수구역으로 유입되어 일대일 대응이 되면 해당 배수지의 급수가 해당 급수구역으로 100 % 유입된다고 판단하여 작성하였다.

시범지역인 예천군은 수원(한천), 취/정수장(예천), 배수지(예천, 호명), 급수구역(예천면, 유천면, 호명면)의 네트워크로 용수를 공급하고 있다. 즉, 수원인 한천의 수위 데이터를 Table 4 감수곡선 식에 적용하여 산정한 취수가능일수는 용수공급 네트워크를 바탕으로 읍면동 단위의 급수지역인 예천면, 유천면, 호명면에 적용할 수 있다. 같은 맥락으로 용수공급 네트워크를 전국 단위로 구축할

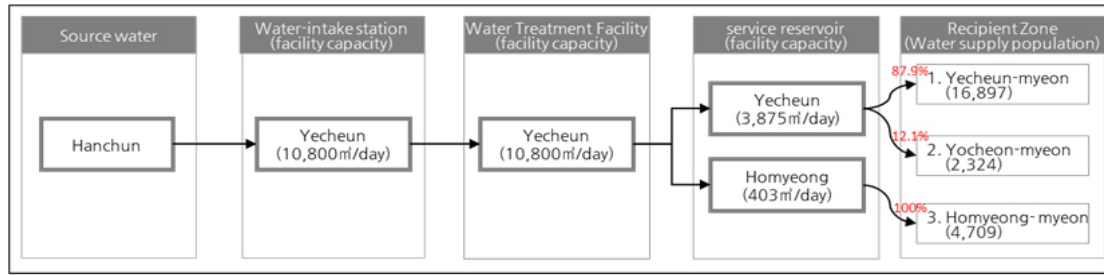


Fig. 7. Water Supply Network in Yecheon

경우 갈수기 등 유량 감소기에 읍면동 단위 취수량 조절 등을 위한 판단 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 연구는 하천을 취수원으로 하는 상수도 시설에 초점을 맞춰 갈수기 등 유량 감소기에 필요한 취수가능일수와 취수원의 영향 범위를 제시하는 것을 목적으로 진행되었으며, 주요 결론 및 시사점은 다음과 같다.

- (1) 시범지역을 대상으로 장기유출모형인 SWAT을 이용하여 일별 가용 유량을 판단하였으며, 매개변수 감보정 결과 결정계수가 0.71, 0.81로 도출되었다.
- (2) 장기유출모형의 결과를 바탕으로 지하수 감수곡선법을 참고하여 하천 유량 감수곡선을 추출하였으며, 각 감수곡선별 유량을 평균하여 감수곡선식을 도출하였다.
- (3) 감수곡선식과 일평균 취수량과의 관계분석을 통해 취수가능일수를 정량적으로 산정하였으며, 실제 데이터를 바탕으로 대상 지역에 적용하여 검증하였다.
- (4) 대상 지역의 용수 공급 네트워크 및 배분율을 제시하여 도출된 취수가능일수를 적용할 수 있는 가뭄 확산 범위를 제시하였다.

기존의 가뭄지수를 이용한 가뭄 예측은 한정된 수자원에 대한 수요 및 공급의 물 배분 지표로 활용하기에는 어려운 상황이며, 실제 가뭄 업무를 일선에서 처리하는 지자체 공무원 등이 갈수기 등 유량 감소기에 취수량 조절 등을 위한 판단 기준 제시에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 가뭄대응에 있어 기존 가뭄지수보다 직관적인 취수가능일수 및 적용 가능 범위를 제시하였다. 최근 기후변화로 인해 예외적이고 발생 가능성이 없어 보이던 가뭄 피해가 발생하고 있으며, 장기적인 가뭄 발생으로 직·간접적 피해가 발생함에 따라 추후 이를 반영할 수 있는 다양한 시나리오 개발 및 복합 영향 평가 방안에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)에 의해 수행되었습니다.

### References

- Arnold, J. G. and Fohrer, N. (2005). "SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Jeong, S. M., Lee, J. H. and Ahn, J. K. (2004). "Water demand and supply stability analysis using shared vision model." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 37, No. 7, pp. 569-579.
- Kim, G. S. and Lee, J. W. (2011). "Evaluation of drought indices using the drought records." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 44, No. 8 (in Korean).
- Kim, T. W. and Park, D. H. (2018). "Guidelines for extreme drought planning adaptation to climate change" *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 66, No. 7, pp. 43-48 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2017). *A study on the development of drought prediction and response system for local water supply system* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2011). *Long term water resource management master plan (2011-2020)* (in Korean).
- National Disaster Management Research Institute (NDMI) (2017). *Development of integrated forecasting and warning platform for national drought information (I)* (in Korean).
- National Disaster Management Research Institute (NDMI) (2018). *The development of surveying techniques for the regional customizing drought information* (in Korean).
- Palmer, R. N., Keyes, A. M. and Fisher, S. M. (1993). "Empowering stakeholders through simulation in water resources planning." *Proc. of 20th Annual Water Resources Planning and Management Conference*, ASCE, Seattle, pp. 451-454.
- Seo, H. D., Jeong, S. M., Kim, S. J. and Lee, J. M. (2008). "A study on the optimal water supply using virtual drought exercise with hydrological drought index." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 41, No. 10 (in Korean).