

DrySAT-WFT 모형을 활용한 전국 하천건천화 분석: 전국 5대강 댐·보 유역의 유입량을 중심으로*

이용관¹ · 정충길² · 김원진¹ · 김성준^{3*}

Analysis of National Stream Drying Phenomena using DrySAT-WFT Model: Focusing on Inflow of Dam and Weir Watersheds in 5 River Basins*

Yong-Gwan LEE¹ · Chung-Gil JUNG² · Won-Jin KIM¹ · Seong-Joon KIM^{3*}

요 약

산업화와 도시개발로 인한 불투수층 면적의 증가는 수문순환 체계를 왜곡시켜 심각한 건천화를 야기한다. 이를 관리하기 위해 건천화의 정량적인 평가 및 예측이 가능한 하천건천화 영향평가 기술이 필요하다. 본 연구에서는 분포형 수문모형(Drying Stream Assessment Tool and Water Flow Tracking, DrySAT-WFT)과 시계열 GIS자료를 활용하여 전국 5대강 유역의 댐·보 유역을 대상으로 하천유입량 감소원인 평가를 실시하였다. 이를 위해 5개 하천건천화 영향요소(토양침식, 산림성장, 도로-하천 단절, 지하수이용, 도시개발)를 선정하여 1976년부터 2015년까지 GIS 기반의 시계열 공간자료를 연대별로 구축하였다. DrySAT-WFT는 2005~2015년까지 8개의 다목적댐(충주댐, 소양강댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 섬진강댐, 주암댐, 용담댐) 및 4개의 유량 관측지점(오수천, 미호천, 마륵, 초강)에 대해 하천유량 검보정을 실시하였고, 검보정 결과 결정계수(R^2)는 평균 0.76(0.66~0.84), Nash-Sutcliffe 모형효율은 평균 0.62(0.52~0.72)의 값을 보였다. 이를 토대로 2010년대(2006~2015)의 기상조건을 기준으로 연대별(1980년대: 1976~1985, 1990년대: 1986~1995, 2000년대: 1996~2005, 2010년대: 2006~2015) GIS자료를 이용하여 댐·보 유역의 하천유입량 변화를 계산함으로써 각 영향요소별 하천유입량 감소 기여비율을 산정하였다. 모의결과, 1980년대를 기준으로 5대강 유역평균 2010년대 풍수량(Q95)은 4.1~6.3%의 감소율을 보였고, 평수량(Q185)은 6.7~9.1%의 감소율을 보였으며, 갈수량(Q355)은 8.4~10.4%의 감소율을 보였다. 하천건천화 영향요소 중에서 지하수 이용량의 증가로 인한 기저유량 감소(하천건천화 기여율: 40.5%)가 가장 큰 영향을

2020년 04월 25일 접수 Received on April 25, 2020 / 2020년 06월 01일 수정 Revised on June 01, 2020
/ 2020년 06월 02일 심사완료 Accepted on June 02, 2020

* 본 연구는 환경부의 물관리연구사업(79617)에서 지원받았습니다.

1 건국대학교 대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료 Dept. of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Ph.D Candidate

2 영산강홍수통제소 예보통제과 시설연구사 Forecast and Control Division, Yeongsan River Flood Control Office, Research Officer

3 건국대학교 사회환경공학부 교수 School of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Professor

* Corresponding Author E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

주었으며, 다음으로는 산림성장에 의한 증발산량 증가(하천건천화 기여율: 29.0%)로 나타났다.

주요어 : DrySAT-WFT, 하천건천화 영향요소, 분포형 수문모형, 풍수량(Q95), 평수량(Q185), 갈수량(Q355)

ABSTRACT

The increase of the impermeable area due to industrialization and urban development distorts the hydrological circulation system and cause serious stream drying phenomena. In order to manage this, it is necessary to develop a technology for impact assessment of stream drying phenomena, which enables quantitative evaluation and prediction. In this study, the cause of streamflow reduction was assessed for dam and weir watersheds in the five major river basins of South Korea by using distributed hydrological model DrySAT-WFT (Drying Stream Assessment Tool and Water Flow Tracking) and GIS time series data. For the modeling, the 5 influencing factors of stream drying phenomena (soil erosion, forest growth, road-river disconnection, groundwater use, urban development) were selected and prepared as GIS-based time series spatial data from 1976 to 2015. The DrySAT-WFT was calibrated and validated from 2005 to 2015 at 8 multipurpose dam watershed (Chungju, Soyang, Andong, Imha, Hapcheon, Seomjin river, Juam, and Yongdam) and 4 gauging stations (Osucheon, Mihocheon, Maruek, and Chogang) respectively. The calibration results showed that the coefficient of determination (R^2) was 0.76 in average (0.66 to 0.84) and the Nash-Sutcliffe model efficiency was 0.62 in average (0.52 to 0.72). Based on the 2010s (2006~2015) weather condition for the whole period, the streamflow impact was estimated by applying GIS data for each decade (1980s: 1976~1985, 1990s: 1986~1995, 2000s: 1996~2005, 2010s: 2006~2015). The results showed that the 2010s averaged-wet streamflow (Q95) showed decrease of 4.1~6.3%, the 2010s averaged-normal streamflow (Q185) showed decreased of 6.7~9.1% and the 2010s averaged-drought streamflow (Q355) showed decrease of 8.4~10.4% compared to 1980s streamflows respectively on the whole. During 1975~2015, the increase of groundwater use covered 40.5% contribution and the next was forest growth with 29.0% contribution among the 5 influencing factors.

KEYWORDS : DrySAT-WFT, Stream drying influence factors, distributed hydrological model, averaged-wet streamflow (Q95), averaged-normal streamflow (Q185), averaged-drought streamflow (Q355)

서론

산업발전을 통해 가속화되고 있는 도시화는 녹지개발, 도로의 아스팔트로 인해 불투수층 면적을 증가시켜 지하수위를 감소시킨다. 이로 인해 우리나라의 중·소하천들은 수문순환 체계가

왜곡되어 심각한 건천화가 진행되고 있다. 강우가 지표로 흡수되지 못하고 단기간 내에 유출되고 갈수기에는 지하수량 부족으로 이어지며, 하천에서 취수된 용수는 사용 후 하수도를 통해 하천 하류의 하수처리장으로 이송되므로 중·소하천의 수위가 떨어지고 수량이 고갈되는 현상이 발생한다. 또한, 건천화에 따른 하천수 부족

은 용수 확보 불가능, 수질 오염 악화 등으로 인한 경제적 손실뿐만 아니라 시민들의 여가 활용과 휴식 공간으로 활용을 위한 친수공간의 기능도 수행하지 못하게 된다. 이를 해결하기 위해 하도 내 저류시설 설치, 투수층 면적 확대 및 지하수 함양 등을 통해 수문순환계를 회복하여 하천의 안정적인 유지용수의 확보가 필요한 실정이다(MST, 2003).

일반적으로 가뭄은 어느 지역의 인간생활 및 사회 경제 활동이나 동식물 생육에 피해를 가져올 정도로 강수량 부족이 장기화되는 것으로 정의되나(Lee *et al.*, 2017), 건천화는 이와 달리 하천이 건천으로 되어가는 과정을 일컬으며, 수문학적으로는 갈수량 기준 이하이고 하천으로부터 필요수량을 지속적으로 제공할 수 없는 하천을 말한다(Jung *et al.*, 2003). 국내에서는 대표적으로 교육과학기술부의 21세기 수자원 프론티어 연구개발사업의 ‘지속가능한 하천수 개발 기술’이 건천화 하천을 대규모로 조사하였으며, 이후 다양한 연구 기관에서 건천화의 원인을 파악하기 위한 연구를 수행해왔다. Park *et al.*(2001)에서는 도시하천 건천화의 주된 원인으로 우리나라 강수 특성이 하절기에 집중되고, 도시화로 인해 녹지가 감소하고 불투수층 면적의 증가로 지하수 함량 부족, 대형하수처리장 위주의 하수처리 방식, 지하수의 무분별한 개발·이용으로 인한 지하수 고갈과 이로 인한 하천고갈이 건천화에 큰 영향을 준 것으로 분석하였다. MST(2003)에서는 건천화의 가장 큰 원인으로 하천수 및 지하수의 과다 사용을 지목하였으며, 다음으로 부적절한 하천 내·외 시설물, 일부 구간의 불투수 면적의 증가와 도시화, 급한 유역경사와 충적지층, 투수성이 큰 하상재질 등 하천의 자연적인 요소를 건천화의 원인으로 제시하였다. GRI(2003)에서는 기상여건, 도시개발, 수자원 이용, 하수처리형태, 치수위주의 하천정비, 법·제도적 문제를 대상하천 건천화의 주된 원인으로 분석하였으며, 기상여건보다는 토지이용에 따른 도시개발 형태가 건천화에 큰 영향을 준 것으로 분석하였다. Lee *et al.*(2003)은 농업용 저수지에서 농업용수로 공

급하는 물은 하천을 따라 흐르지 않으므로 수문순환을 변형시키고, 하천수 저류가 불리한 구간의 집수암거가 다수 설치되어 있고, 보에 의한 하천수 취수 등이 하천을 건천화시키는 것으로 제시하였다. Yi *et al.*(2004)에서는 강우의 양극화 현상으로 인한 홍수기의 유출률 증가와 갈수기의 지하수위 저하 및 급격한 도시화를 원인으로 제시하였다. Seo *et al.*(2004)은 하천수가 지하로 침투하여 지표수를 감소시킴으로서 하천의 건천화가 발생하는 것으로 분석하였다. Lee *et al.*(2006)은 안양천 유역의 경우 하류에 대규모 하수처리방식을 채택하고 있어 하수발생원으로부터 하수처리장까지 차집관거가 너무 길어 상류의 건천화가 발생하는 것으로 분석하였다. RRI(2006)은 평택시 진위천 유역 14개 소하천에 대한 분석 결과 건천화가 한가지 요인에 따른 영향이 지배적인 것이 아니라 복합적으로 나타나고 있는 것으로 파악하였으며, 생·공용수의 사용을 위한 지하수 개발 등 다양한 요인을 고려하는 것이 필요할 것으로 분석하였다. MLTM(2009)은 SWMM-GE 모형을 활용해 갑천, 남천, 경안천, 왕숙천 유역을 분석하였으며, 도시화로 인한 불투수율 증가, 공업용 지하수 사용량 증가, 유역내 물이동에 의한 인위적인 환경변화 등을 건천화의 주요 원인으로 제시하였다.

선행 연구사례로부터 건천화의 주요 원인은 크게 유역 및 하도 특성 변화, 수문기상 변화 및 지하수 이용량 증가, 토지이용 변화로 인한 불투수면적 변화 등으로 정리할 수 있다. 그러나 SWMM-GE 모형을 통해 건천화의 정량적인 해석을 시도한 MLTM(2009)의 연구사례를 제외하면, 건천화 주요 원인을 종합적으로 고려하지 못한 한계가 있고, 그 동안의 연구사례는 특정 시기에 특정 지점에서 특정 유량기준을 만족하는지에 대한 평가 위주의 1차원적 해석으로 연구가 수행되었다. Jung *et al.*(2019)에서는 하천건천화 영향평가를 위해 물수지 기반의 분포형 수문모형(Drying Stream Assessment Tool and Water Flow Tracking, DrySAT-WFT)을 개발하고, 건천화 영향요소 5개를 선정

하여 요소별로 건천화에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 이 연구에서는 전국 표준유역에 대해 1976년부터 2015년까지 연대별로 하천건천화 지수(stream drying index, SDI)를 산정하여 건천화의 진행 정도를 등급화하여 평가하였으나, 실제 유량의 감소량을 정량적으로 제시하지는 않았다. 하천건천화지수를 통한 전국 표준유역의 평가는 하천건천화 현황을 파악하기에는 용이하나, 각 유역별 특성을 고려한 건천화 원인 추적에는 한계가 있다.

본 연구에서는 선행 연구(Jung *et al.*, 2019)에서 모의한 결과를 기반으로 전국을 5대강 유역으로 구분하고, 각 5대강 유역의 댐·보 지점에 대하여 1980년대 대비 2010년대에 감소한

유입량과 감소 원인을 하천건천화 영향요소별 기여비율 분석을 통해 정량적으로 제시하고자 한다.

자료 및 방법

선행 연구(Jung *et al.*, 2019)에서는 하천건천화 영향요소(산림높이, 지하수이용량, 도로망, 토지이용, 토심 변화)를 DrySAT-WFT 모형에 적용해 1976년부터 2015년까지 수문모의를 실시하였고, 8개의 다목적댐(충주댐, 소양강댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 섬진강댐, 주암댐, 용담댐) 및 4개의 유량 관측지점(오수천, 미호천, 마륵, 초강)에 대해 하천유량 검보정을 실시하

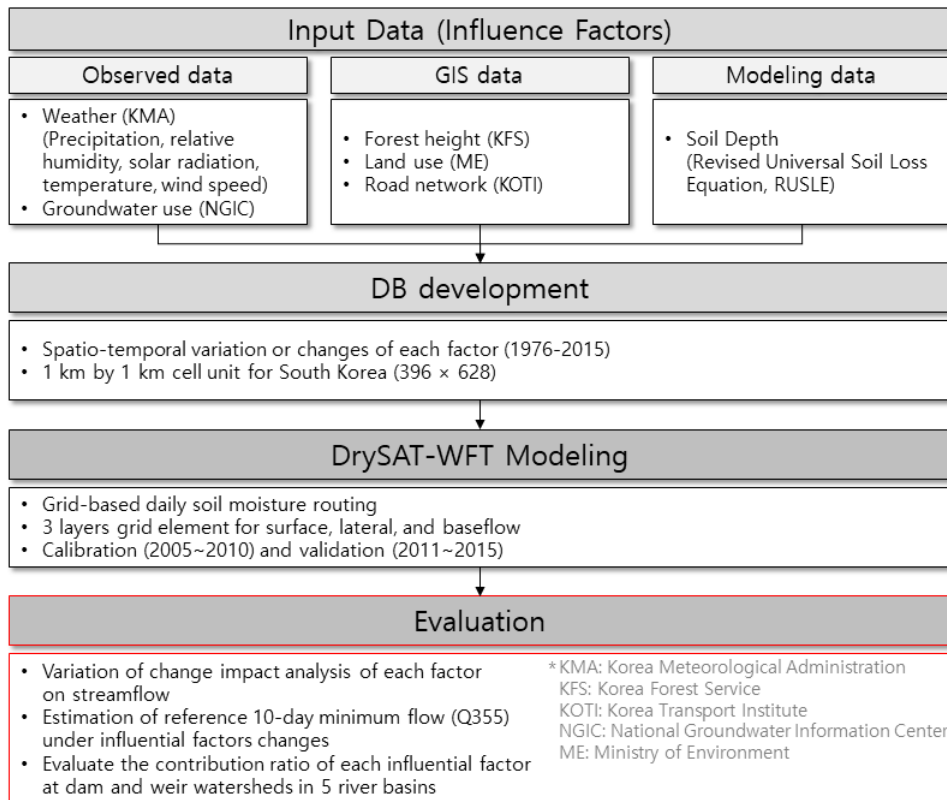


FIGURE 1. Flowchart of the study. Based on the results of the previous study (Jung *et al.*, 2019), the impact assessment of stream drying phenomena was carried out at dam and weir watersheds in 5 river basins (the red squares in the figure).

$$Contribution\ Ratio = \left(\frac{Streamflow\ decreases\ when\ applying\ each\ influential\ factor}{Streamflow\ decreases\ when\ applying\ all\ influential\ factors} \right) \times 100 \quad (1)$$

였다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 2010년대(2006~2015)의 기상, 토양, 산림, 도로, 지하수, 토지이용, 하천유출량 조건을 기준으로 연대별(1980년대: 1976~1985, 1990년대: 1986~1995, 2000년대: 1996~2005, 2010년대: 2006~2015)로 전국 5대강 댐·보 지역의 하천유입량 변화를 계산하였고, 이를 풍수량(Q95), 평수량(Q185), 갈수량(Q355)으로 구분하여 나타내었다. 또한, 건천화 영향요소별 하천유입량 감소 기여비율을 산정하였는데(식 1),

기여비율은 전체 영향요소를 적용하였을 때의 감소하는 유량의 총량을 기준으로 각 영향요소를 적용한 뒤 감소하는 유량을 비율로 산정하였다(그림 1).

1. 대상유역

본 연구에서는 전국을 5대강유역으로 구분하여 각 유역의 댐보 지점에 대해 하천건천화 영향평가를 실시하였다(그림 2). 한강유역은 안성천 유역을 포함한 영역으로, 유역 내 4개의 다

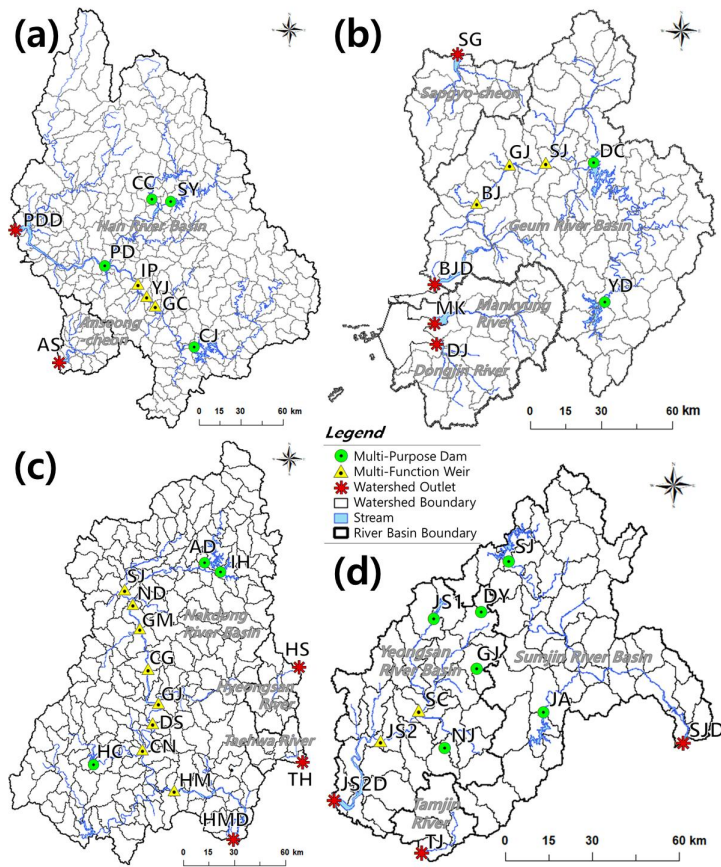


FIGURE 2. Dam and weir locations of the five major river basins: (a) Han river, (b) Geum river, (c) Nakdong river, and (d) Yeongsan and Sumjin river

목적댐(춘천댐(CC), 충주댐(CJ), 소양강댐(SY), 팔당댐(PD))과 3개의 다기능보(강천보(GC), 이포보(IP), 여주보(YJ)), 그리고 유역출구 지점(팔당댐하류(PDD), 안성천(AS))에 대해 영향평가를 실시하였다(그림 2a). 금강 유역은 삽교천 유역과 만경·동진강 유역을 포함하여 구분하였으며, 2개의 다목적댐(대청댐(DC), 용담댐(YD))과 3개의 다기능보(백제보(BJ), 공주보(GJ), 세종보(SJ)), 그리고 4개의 유역출구 지점(삽교천(SG), 백제보하류(BJD), 만경강(MK), 동진강(DJ))에 대해 분석을 실시하였다(그림 2b). 낙동강 유역은 태화강 유역과 형산강 유역을 포함하였으며, 3개의 다목적댐(안동댐(AD), 임하댐(IH), 함천댐(HC)), 8개의 다기능보(칠곡보(CG), 창녕보(CN), 달성보(DS), 강정보(GJ), 구미보(GM), 함안보(HM), 낙단보(ND), 상주보(SJ)), 3개의 유역출구 지점(형산강(HS), 태화강(TH), 함안보하류(HMD))에 대해 건천화 영향평가를 수행하였다(그림 2c). 영산강과 섬진강 유역은 탐진강 유역을 포함하여 6개의 댐(섬진강댐(SJ), 주암댐(JA), 나주댐(NJ), 장성댐(JS1), 광주댐(GJ), 담양댐(DY))과 2개의 다기능보(승촌보(SC), 죽산보(JS2)), 3개의 유역출구 지점(섬진강댐하류(SJD), 죽산보하류(JS2D), 탐진강(TJ))에 대해 분석을 실시하였다(그림 2d).

2. DrySAT-WFT

DrySAT-WFT 모형은 PGA-CC(Projection of Hydrology via the Grid-based Assessment for Climate Change)를 기반으로 하천건천화 원인 규명 및 영향평가를 위해 개발된 분포형 수문모형이다. 하천건천화 원인 추적을 위해 시간에 따른 지형의 공간적 변화를 고려할 수 있는 하천건천화 영향요소(산림높이, 지하수이용량, 도로망, 토지이용, 토심 변화)를 입력자료로 활용하도록 하였으며, 입력자료 및 출력자료의 전후처리 기능을 강화하였다.

DrySAT-WFT 모형은 토양층을 3개로 나누어 계산하는 3단 구성의 형태를 가지며 각 토양

층에 대해 격자별로 지표유출, 중간유출, 기저유출, 증발산, 침투 및 침투 등을 일단위로 모의한다(그림 3). 모형은 크게 토양수분, 증발산, 유출 산정 모듈로 구성되어있으며, 물수지 식을 기반으로 계산된다(식 2).

$$SM_{t,i} = SM_{t-1,i} + R_{t,i} - ET_{t,i} - Q_{surf,i} - Q_{latf,i} - Q_{basf,i} \quad (2)$$

여기서, i 는 셀 격자의 주소를 나타내고 t 는 모의 당일(day), $t-1$ 은 모의 전일, SM_t 는 모의 당일의 토양수분(mm), SM_{t-1} 은 모의 전일의 토양수분(mm), R_t 는 당일의 강우량(mm), ET_t 는 당일의 증발산량(mm), Q_{surf} 는 지표유출량(mm), Q_{latf} 는 중간유출량(mm), Q_{basf} 는 기저유출량(mm)을 의미한다.

증발산량 산정은 Food and Agriculture Organization(FAO)의 Penman-Monteith 식을 적용하였으며, 하천건천화 영향요소 중 산림 높이의 변화를 다음의 공기역학적 저항(Aerodynamic resistance, γ_a) 계산식을 활용하였다(식 3).

$$\gamma_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{0m}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (3)$$

여기서, γ_a 는 공기역학적저항(s/m), z_m 은 풍속 측정높이, d 는 풍속 단면의 영점 위치, z_{0m} 는 운동량 변환에 대한 조도 길이(m), z_h 는 습도 측정 높이(m), z_{oh} 는 증기와 열 변환에 대한 조도 길이(m), k 는 von Karmas 상수(0.41), u_z 는 높이 z_m 에서의 풍속(m/s)을 의미한다. 식 3의 인자 중 z_{0m} 와 z_{oh} 계산에 연대별 산림 높이가 증가에 따른 증발산량의 변화를 고려할 수 있게 적용하였다.

지하수 유출은 Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 모형에서 활용하는 지하수 알고리즘을 응용하여 적용하였으며, 다음과 같다(식 4).

$$aq_t = aq_{t-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump} \quad (4)$$

여기서, aq_t 는 t 일의 얕은 대수층 저류량(mm), aq_{t-1} 은 $t-1$ 일의 대수층 저류량(mm), w_{rchrg} 은 t 일의 대수층 함양수량(mm), Q_{gw} 는 지하천으로 유입되는 지하수량(mm), w_{revap} 은 물부족으로 인하여 이동하는 물의 양(mm), w_{pump} 는 양수에 의해 배수되는 물의 양(mm)을 의미한다. DrySAT-WFT 모형에서는 Q_{gw} 와 w_{pump} 에 대해 하천건천화 DB를 적용하여 시간에 따른 변화량을 고려할 수 있도록 하였다. 이 밖에 모형에서 활용한 각각의 물수지 식은 Jung *et al.*(2019)에서 자세히 설명하였다.

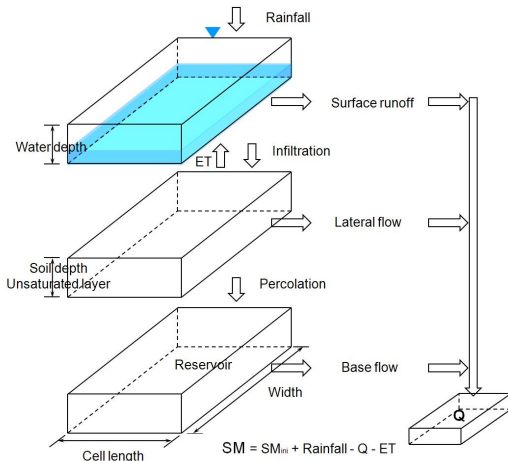


FIGURE 3. Soil layers of the DrySAT-WFT model

2. 하천건천화 영향요소 및 평가방법

산림은 증발산량, 산림 지하수 자원 등에 밀접한 관계가 있는 건천화 주요 영향 요소 중 하나로, 산림분포변화는 한국전쟁 이후 파괴되었던 산림의 회복으로 인해 증발산 및 토양 수분량에 변화를 초래할 수 있고 나아가 하천으로 유입되는 유량을 변동시킨다. 전국 산림의 상태를 파악하기 위해 산림청에서 운영하는 산림공간정보서비스(<http://map.forest.go.kr/forest/#/>)에서 자료를 수집하였으며, 임분수확

표와 산림자원 관리지침은 국립산림과학원에서 자료를 수집하였다. 수집한 임상도 속성 내 임상 구분에 대한 산림 나이와 나이에 대한 지위지수 정보를 활용해 산림 높이를 산정하였으며, 구축 기간에 따른 1~5차 임상도를 통해 1976년부터 2015년까지 시계열 산림 밀도 및 높이 자료를 구축하였다(그림 4a).

지하수 이용량은 하천 수위와 밀접한 관련이 있는 건천화 주요 영향요소로서, K-water에서 운영하는 국가지하수정보센터(<https://www.gims.go.kr/>)에서 제공되는 지하수 연보를 통해 시군구 단위의 지역별, 용도별, 월별 지하수 이용량 자료를 구축하였다. 또한 지자체 지하수 관리 기본계획보고서를 통해 연평균 증감률을 확인하고, 월별 지하수 이용량 비율 변화와 같이 정리하여 1976년부터 2015년까지의 시계열 지하수 이용량 자료를 구축하였다(그림 4b).

급격한 도시화로 인한 불투수층(도시 및 도로망)의 증가는 회귀수량을 감소시키고, 해당 지역에서의 모든 유출량은 직접 유출로 빠져나가거나 증발되어 지표하 유출량을 감소시켜 건천화를 야기시킨다. 도로망도는 한국교통연구원에서 운영하는 국가교통DB(<https://www.ktdb.go.kr/>)에서 2005년부터 2015년까지 전국 도로망도 자료를 수집하였다. 또한 한국도로공사와 지방국토관리청에서 제공하는 고속도로, 국도 현황정보 및 연혁 정보와 도로 건설관리 계획 및 보고서 자료 수집을 통해 1976년부터 2015년까지의 시계열 도로망도를 구축하였다(그림 4c). 도시면적의 변화를 추적하기 위한 토지이용 변화는 환경부에서 운영하는 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr/>)에서 중분류 토지피복도를 2000년부터 2015년까지 구축하였으며, 1980년부터 2000년까지는 중분류 토지피복도가 존재하지 않았으므로 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공되는 대분류 토지피복도를 구축하였다(그림 4d).

토심의 감소는 토양수분량을 감소시키고 침투 유량을 증가시킬 뿐만 아니라 가뭄 및 홍수에 큰 영향을 줄 수 있는 건천화 영향요소이다. 토심의 변화는 수정범용토양유실방정식(Revised

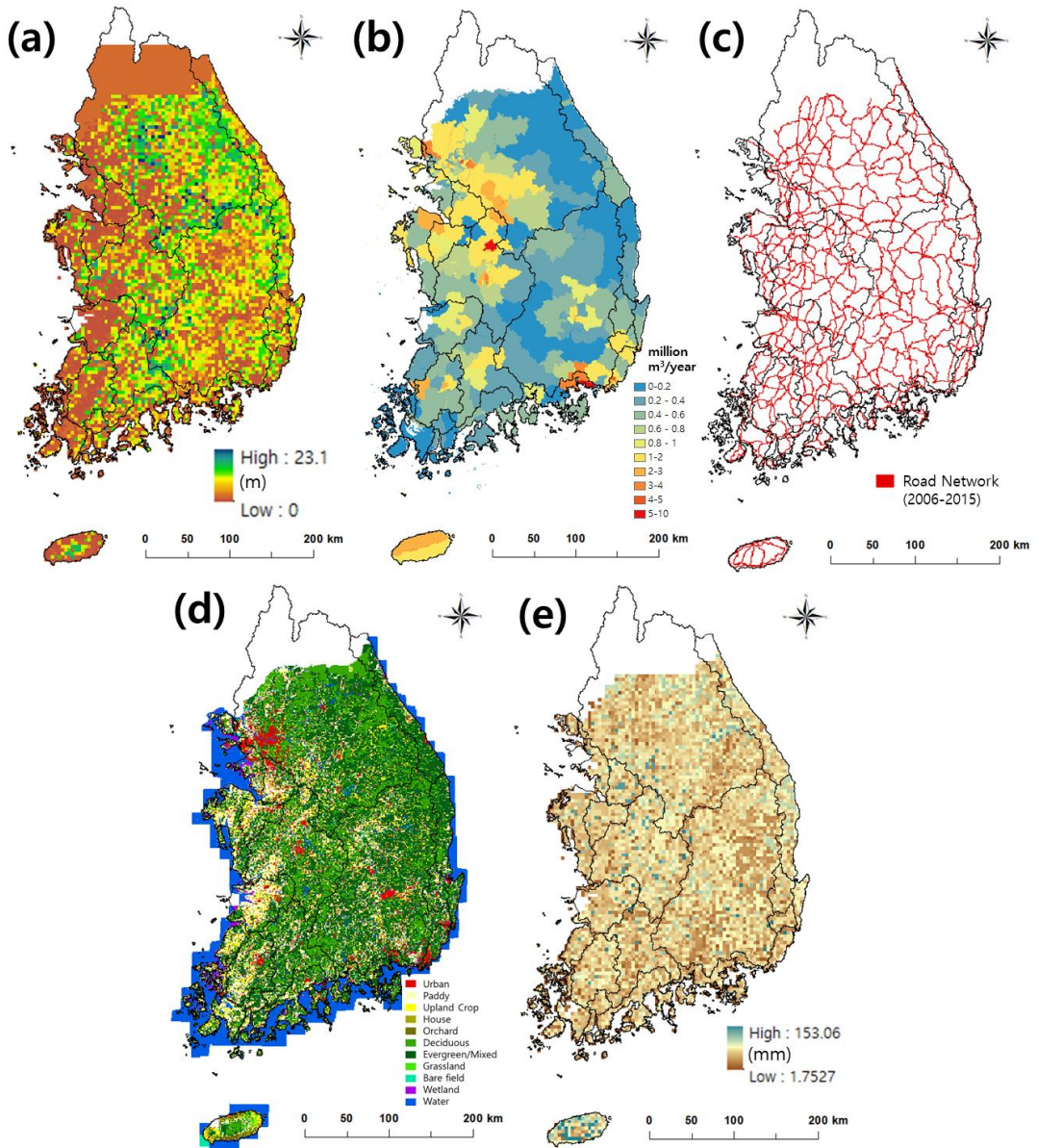


FIGURE 4. Input data of DrySAT-WFT model at 2015: (a) Forest height, (b) Groundwater Use, (c) Road Network, (d) Land Use, and (e) Soil erosion depth

Universal Soil Loss Equation, RUSLE)에서 제시한 Sediment delivery 공식을 이용한 토양 침식모델링을 통해 산정하였다. RUSLE의 가장 중요한 인자에 해당하는 강우침식량은 총 강우량에 따른 강우침식량을 산정하기 위해 전국

62개 지점 1분 강우자료를 수집하여 연도별 강우침식인자를 산정하였고, 총 강우량의 상관분석을 실시하여 총 강우량에 따른 강우침식인자 최신 경험식을 산정하여 적용하였다(Jung *et al.*, 2016). 전국 강우침식량의 산정결과로부터

TABLE 1. Influential factors of stream drying phenomena for DrySAT-WFT model

Influential Factors	Construction period	Data description	Source[a]
Forest Height	1976~2015	Forest height according to the forest type	NIFS
Groundwater use	1976~2015	Amount of groundwater use from national underground observation network	NGIC
Road Network	1976~2015	Road network data from national traffic DB	KTDB
Land use	1976~2015	Land use changes	EGIS, WAMIS
Soil Depth	1976~2015	Soil depth changes	RUSLE
Weather data	1976~2015	Precipitation, relative humidity, solar radiation, maximum, minimum, and mean temperature, wind speed	KMA

[a] NIFS: National Institute of Forest Science
 NGIC: National Groundwater Information Center
 KTDB: Korea Transport database
 EGIS: Environmental Geographic Information Service
 WAMIS: Water Resources Management Information System
 RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation (Modeling Results)
 KMA: Korea Meteorological Administration

1976년부터 2015년까지의 토양침식량을 산정하였고, 이에 따른 전국 토심변화를 산정하여 적용하였다(그림 4e).

모형 구동을 위한 기상 자료는 강수량, 상대 습도, 일사량, 최고기온, 평균기온, 최저기온, 풍속 자료가 필요하며 기상청에서 운영하는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)에서 기간별, 지역별 자료를 구축하였다. 구축한 자료를 역거리가중법(Inversed Distance Weighted method, IDW)을 활용해 모형의 입력자료에 맞게 1km의 공간해상도로 보간하여 사용하였다. 본 연구에서 활용한 하천건천화 영향요소는 표 1에 정리하였으며, 구축 과정에 대한 자세한 내용은 Yoo *et al.*(2018)에 소개되어있다.

결과 및 고찰

1. DrySAT-WFT 모형 검보정 결과

DrySAT-WFT 기준 시나리오에 대한 유출 모의 결과는 선행논문(Jung *et al.*, 2019)에서 8개의 다목적댐(충주댐, 소양강댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 섬진강댐, 주암댐, 용담댐) 및 4개의 유량 관측지점(오수천, 미호천, 마륵, 초강)을 대상으로 2005~2010년과 2011~2015년에 대해 검·보정한 결과를 활용하였다. 보정방법은 DrySAT-WFT 모형의 유출 관련 매개변수

를 이용하여 각 유역의 특성에 맞게 조정하였다. DrySAT-WFT 모형의 검보정은 지표 유출과 관련 있는 매개변수가 모형의 침투 유출과 전체 유출량에 매우 민감하게 영향을 주는 것으로 나타났고, 침투량에 영향을 주는 매개변수가 기저유출에 민감하게 영향을 주는 경향을 보였다.

보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(Coefficient of determination, R^2), Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)를 사용하였다. R^2 는 0에서 1 사이의 값으로 표현되며, 1에 가까울수록 높은 상관성을 의미한다. NSE는 $-\infty$ 에서 1 사이의 값을 나타내며, 1에 가까울수록 모형의 성능이 좋음을 나타낸다. 일반적으로 R^2 는 0.5 이상, NSE는 적어도 0 이상의 값을 나타낼 때 허용 가능한 것으로 판단한다. 12개 유역에 대한 검보정 결과(표 2), 평균 R^2 는 0.76으로 0.66에서 0.84까지의 값을 보였고, 평균 NSE는 0.62로 0.52에서 0.72까지의 값을 나타내었다. 그림 5는 R^2 가 가장 높은 소양강댐과 가장 낮은 주암댐의 유출량에 대한 수문곡선을 DrySAT-WFT 모형의 모의 결과와 비교하여 나타낸 것이며, 주암댐과 같이 일부 유역에서 침투유량 값에 차이가 나타나는 모습을 보였으나 전반적으로 관측 자료의 유량 변동 경향을 유사하게

TABLE 2. Statistical summary of the DrySAT-WFT runoff results at 12 watersheds (Jung *et al.*, 2019)

Objective functions	CJ	SY	AD	IH	HC	SJ	YD	JA	OSC	MHC	MR	CG	Avg.
R^2	0.68	0.84	0.71	0.84	0.82	0.78	0.83	0.66	0.80	0.74	0.76	0.69	0.76
NSE	0.52	0.66	0.56	0.68	0.67	0.55	0.72	0.55	0.70	0.68	0.60	0.54	0.62

Note: CJ: Chungju dam; SY: Soyonggang dam; AD: Andong dam; IH: Imha dam; HC: Hapcheon dam; SJ: Seomjingang dam; OSC: Osucheon; JA: Juam dam; YD: Yongdam dam; MHC: Mihocheon; MR: Mareuk; CG: Chogang; Avg.: Average

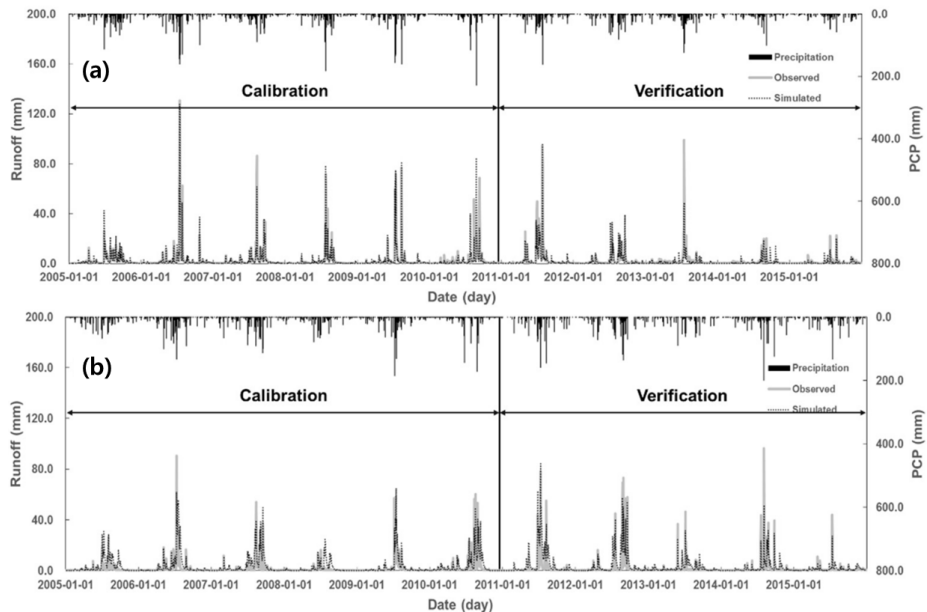


FIGURE 5. Comparison of the observed and DrySAT-WFT simulated daily runoff during 2006–2015 at (a) Soyonggang Dam (SY) and (b) Juam dam (JA) (Jung *et al.*, 2019)

재현하는 모습을 보였다.

2. 전국 5대강의 주요 댐·보 유역별 유황 변화분석 및 건천화 영향평가

DrySAT-WFT 모형의 유출 모의결과를 바탕으로 건천화 영향요소 DB를 적용하여 전국 5대강 유역의 주요 댐·보 유역별 유황의 변화를 분석하고 그에 대한 건천화 영향요소의 기여율을 산정하여 평가하였다.

한강 유역에 대한 유황 변화분석 결과(표 3), 전반적으로 풍수량에 비해 갈수량의 감소율이

높은 것으로 나타났으며 지하수 이용량이 유량 감소에 가장 크게 기여하고 있는 것으로 나타났다. 풍수량의 경우 팔당댐 하류(PDD)에서 100.2m³/s에서 97.5m³/s로 2.7%가 감소하여 가장 작은 감소폭을 보였고, 이포보가 20.8m³/s에서 19.4m³/s로 6.5%가 감소해 가장 높은 감소율을 보였다. 팔당댐 및 팔당댐 하류의 경우 수원이 풍부한 유역의 특성상 풍수량의 감소폭이 작은 것으로 판단되며, 갈수량의 감소폭도 다른 유역에 비해 작은 모습을 보였다. 이포보의 경우 흐르는 유량의 절대량이 적기 때문에 상대적으로 작은 감소량에도 불구하고 감소율이

TABLE 3. Analysis results of flow duration changes and contribution rate for stream drying phenomena at Han river basin

Name ^[a]	Area (km ²)	Flow duration (1980s) (m ³ /s)			Flow duration (2010s) (m ³ /s) (reduction rate, %)			Contribution rate (%) ^[c]				
		Q95 ^[b]	Q185 ^[b]	Q355 ^[b]	Q95	Q185	Q355	GW	SD	FH	RN	LU
AS	1,658.7	63.0	30.8	19.5	60.4 (-4.1)	28.4 (-7.9)	18.0 (-8.0)	54.6	11.4	18.3	9.5	6.3
CC	1,731.4	61.7	24.2	12.0	59.6 (-3.4)	22.8 (-5.8)	11.4 (-5.1)	34.2	9.4	39.6	10.5	6.3
CJ	6,705.1	285.3	112.2	56.4	274.1 (-3.9)	105.9 (-5.6)	52.9 (-6.3)	23.6	13.6	41.0	12.7	9.1
GC	4,295.5	161.6	64.0	36.3	154.0 (-4.7)	60.1 (-6.1)	32.8 (-9.7)	41.5	10.7	29.7	11.8	6.4
IP	544.9	20.8	9.7	6.4	19.4 (-6.5)	8.5 (-12.5)	5.4 (-15.1)	59.0	10.0	15.2	10.3	5.4
PD	3,609.5	135.9	54.4	28.7	131.0 (-3.5)	51.8 (-4.8)	26.8 (-6.6)	43.1	9.8	30.0	10.6	6.4
PDD	2,363.6	100.2	50.3	30.9	97.5 (-2.7)	48.4 (-3.7)	28.8 (-6.8)	69.1	10.3	12.9	4.6	3.1
SY	2,783.2	100.4	38.9	19.0	96.3 (-4.1)	36.8 (-5.4)	17.7 (-6.6)	24.4	13.5	38.8	11.5	11.9
YJ	383.1	15.0	6.2	3.7	14.4 (-4.1)	5.6 (-8.3)	3.3 (-11.0)	46.6	10.0	25.7	11.9	5.7
Avg.	2,675.0	104.9	43.4	23.7	100.7 (-4.1)	40.9 (-6.7)	21.9 (-8.4)	44.0	11.0	27.9	10.4	6.7

^[a] AS: Anseong-cheon; CC: Chuncheon dam; CJ: Chungju dam; GC: Gangcheon weir; IP: Ipo weir; PD: Paldang dam; PDD: the downstream of the Paldang dam; SY: Soyang dam; YJ: Yeosu weir; Avg.: Average

^[b] Q95: Averaged-wet streamflow; Q185: Averaged-normal streamflow; Q355: Averaged-drought streamflow

^[c] GW: ground water; SD: soil depth; FH: forest height; RN: road network; LU: land use

높게 산정된 것으로 보인다. 풍수량과 마찬가지로 갈수량도 유량이 적은 이포보와 여주보에서 각각 15.1%, 11.0%의 높은 감소율을 보였으며, 이를 제외하면 5.1%에서 9.7%의 감소율을 보였다. 대부분의 유역에서 지하수 이용량의 증가가 건천화를 가속시키는데 가장 큰 기여를 한 것으로 나타났다. 특히 팔당댐 하류의 경우 69.1%의 높은 기여율을 나타냈는데, 도시가 이미 발달되어 있는 도시 유역의 특성상 산림 높이, 도로망 증가와 같은 다른 요소가 유량 감소에 미치는 영향이 미미하기 때문으로 보인다. 유역 내 산림의 분포가 많은 소양강댐과 충주댐, 춘천댐 유역은 산림높이의 증가로 인한 증발산량의 증가 및 강우 차단량의 증가가 유역의 유량 감소율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

금강 유역은 시간에 따른 풍수량, 갈수량의 변화는 한강 유역과 유사하게 나타났으나, 건천화 기여율은 모든 댐·보 유역에서 지하수 이용량이 가장 큰 기여를 하는 것으로 나타났다(표 4). 풍수량은 3.8%(삽교천)에서 8.0%(동진강)의 감소율을 보였고, 갈수량은 6.1%(용담댐)에서 10.7%(세종보)의 감소율로 풍수량에 비해 더 큰 감소폭을 보였다. 세종보와 용담댐 유역을 제외하면, 전체 유역에서 지하수 이용량이 건천화에 가장 큰 영향을 주었고, 산림높이, 도로망, 토심, 토지이용변화의 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다. 세종보와 용담댐 유역의 경우 도로망 변화보다 토심의 변화가 건천화에 더 큰 영향을 준 것으로 분석되었으며, 이는 유역 내 도로망의 분포가 다른 댐·보 유역에 비해 적기 때문인 것으로 판단된다.

TABLE 4. Analysis results of flow duration changes and contribution rate for stream drying phenomena at Geum river basin

Name ^[a]	Area (km ²)	Flow duration (1980s) (m ³ /s)			Flow duration (2010s) (m ³ /s) (reduction rate, %)			Contribution rate(%) ^[c]				
		Q95 ^[b]	Q185 ^[b]	Q355 ^[b]	Q95	Q185	Q355	GW	SD	FH	RN	LU
BJ	545.5	18.5	7.9	4.6	17.7 (-4.3)	7.4 (-6.8)	4.1 (-10.3)	32.5	13.5	31.9	16.8	5.2
BJD	1,313.1	47.0	20.6	11.8	44.9 (-4.4)	19.3 (-6.2)	11.0 (-6.6)	34.5	14.2	25.2	18.4	7.8
DC	3,303.4	120.7	44.5	20.8	115.6 (-4.3)	41.3 (-7.2)	19.1 (-8.3)	48.6	6.9	30.7	9.0	4.8
DJ	1,161.5	40.9	17.7	10.4	37.7 (-8.0)	16.0 (-9.9)	9.5 (-8.6)	39.0	13.8	24.9	15.1	7.2
GJ	640.7	21.4	9.3	5.7	20.4 (-4.4)	8.5 (-8.1)	5.12 (-10.6)	34.5	14.2	25.2	18.4	7.8
MK	1,600.5	56.4	25.3	14.9	52.8 (-6.5)	22.8 (-9.9)	13.5 (-9.4)	41.1	11.2	25.5	13.1	9.1
SG	1,668.4	65.5	34.9	25.4	63.0 (-3.8)	32.7 (-6.4)	23.7 (-6.5)	32.2	17.0	27.8	11.1	11.8
SJ	2,855.3	100.9	44.5	26.6	95.9 (-5.0)	40.1 (-10.0)	23.8 (-10.7)	54.4	10.5	20.4	10.2	4.5
YD	930.4	36.9	13.4	6.4	35.4 (-4.3)	12.5 (-6.9)	6.0 (-6.1)	34.9	13.6	33.6	10.2	7.7
Avg.	1,557.6	56.5	24.2	14.1	53.7 (-5.0)	22.3 (-7.9)	12.9 (-8.6)	39.1	12.8	27.2	13.6	7.3

^[a] BJ: Baekje weir; BJD: the downstream of Baekje weir; DC: Daechong dam; DJ: Dongjin river; GJ: Gongju weir; MK: Mankyung river; SG: Sapgyo-cheon; SJ: Sejong weir; YD: Yongdam dam; Avg.: Average

^[b] Q95: Averaged-wet streamflow; Q185: Averaged-normal streamflow; Q355: Averaged-drought streamflow

^[c] GW: ground water; SD: soil depth; FH: forest height; RN: road network; LU: land use

낙동강 유역은 유역의 크기가 큰 만큼 다른 유역에 비해 댐·보 유역이 많았으나, 풍수량과 갈수량을 비롯한 전체적인 유량은 한강 유역에 비해 낮은 모습을 보였다. 1980년대의 풍수량 평균은 한강 유역이 104.9m³/s이고, 금강 유역은 56.5m³/s, 낙동강 유역은 63.6m³/s로 두 번째로 높았으나, 풍수량 및 갈수량은 각각 23.4 m³/s와 11.7m³/s로 금강 유역보다도 작은 모습을 보였으며 이는 2010년대의 분석 결과에서도 같은 모습을 보였다. 건천화 기여율의 경우 안동댐, 구미보는 산림 높이가 각각 33.0%, 32.4%로 가장 높았고 다른 댐·보 유역은 지하수 이용량이 가장 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 칠곡보와 낙단보는 지하수 이용량이 51.3%, 49.5%로 절반에 가까운 영향을 끼치는 것으로 분석되었으며, 전반적으로 토지이용변화의 영향

이 가장 작은 것으로 나타났다. 다른 유역과 마찬가지로 DrySAT-WFT 모형에 있어 도로망과 토지이용 변화는 불투수면적의 증가에 영향을 주는 인자로서 직접적인 수문 요소의 계산에 관여하는 다른 인자(지하수 이용량, 토심, 산림 높이)와 달리 그 영향이 적기 때문인 것으로 판단된다.

영산강 및 섬진강 유역은 5대강 유역 중 풍수량, 평균풍수량, 갈수량이 가장 낮은 모습을 보였다. 풍수량 평균값은 27.6m³/s으로 금강 유역의 절반 수준으로 나타났고, 풍수량과 갈수량의 평균값은 11.0, 6.2m³/s으로 낙동강 유역(각각 23.4, 11.7m³/s)과 비교해 절반 정도인 것으로 나타났다. 특히 유역면적이 작은 나주댐, 담양댐, 광주댐의 경우 풍수량이 각각 2.82, 1.55, 1.39m³/s로 나타났고, 갈수량은 1m³/s보다도 작

TABLE 5. Analysis results of flow duration changes and contribution rate for stream drying phenomena at Nakdong river basin

Name ^[a]	Area (km ²)	Flow duration (1980s) (m ³ /s)			Flow duration (2010s) (m ³ /s) (reduction rate, %)			Contribution rate (%) ^[c]				
		Q95 ^[b]	Q185 ^[b]	Q355 ^[b]	Q95	Q185	Q355	GW	SD	FH	RN	LU
AD	1,628.7	70.4	23.1	9.4	66.2 (-6.0)	22.1 (-4.4)	8.7 (-7.4)	31.2	13.0	33.0	10.3	12.6
CG	1,544.1	56.4	22.0	11.7	54.1 (-4.1)	20.7 (-5.8)	10.8 (-7.4)	51.3	7.5	25.8	10.1	5.3
CN	1,402.2	49.0	18.7	9.7	46.8 (-4.4)	17.1 (-8.2)	8.8 (-8.6)	35.9	11.6	30.2	14.3	8.1
DS	258.6	10.2	4.4	2.5	9.9 (-3.6)	4.1 (-5.8)	2.3 (-7.7)	38.5	15.0	23.0	16.2	7.3
GJ	2,663.4	101.9	40.9	22.9	97.0 (-4.9)	37.6 (-8.1)	20.3 (-11.5)	40.2	11.4	25.7	14.8	7.9
GM	154.6	5.2	2.3	1.5	5.0 (-4.0)	2.2 (-6.1)	1.3 (-8.7)	22.5	15.5	32.4	18.3	11.3
HC	928.8	34.7	12.3	6.0	33.6 (-3.3)	11.5 (-6.6)	5.7 (-5.9)	40.1	6.8	38.5	8.7	5.9
HM	1,995.6	75.7	28.8	14.0	71.5 (-5.6)	25.8 (-10.4)	12.5 (-11.0)	44.3	11.0	23.0	13.8	7.8
HMD	2,277.4	82.1	30.8	16.3	77.8 (-5.2)	28.3 (-8.0)	14.5 (-11.2)	44.1	9.5	28.2	12.3	5.9
HS	1,140.0	42.6	17.2	9.6	40.6 (-4.9)	16.0 (-7.3)	8.7 (-9.7)	29.9	14.8	29.3	18.2	7.9
IH	1,975.8	81.4	25.7	9.6	79.1 (-2.8)	24.3 (-5.3)	9.1 (-5.1)	40.8	6.2	39.4	7.8	5.8
ND	1,560.1	58.3	21.0	9.7	56.4 (-3.3)	20.0 (-4.9)	8.7 (-8.2)	49.5	8.0	27.9	10.6	4.1
SJ	4,880.8	197.3	70.0	34.7	190.6 (-3.4)	66.4 (-5.0)	32.2 (-7.1)	37.2	11.0	31.1	12.0	8.8
TH	660.9	24.9	10.4	5.7	24.0 (-3.9)	9.6 (-7.8)	5.1 (-10.8)	41.7	13.1	25.2	14.7	5.3
Avg.	1,647.9	63.6	23.4	11.7	60.9 (-4.2)	21.8 (-6.7)	10.6 (-8.6)	39.1	11.0	29.5	13.0	7.4

^[a] AD: Andong dam; CG: Chilgok weir; CN: Changnyong weir; DS: Dalseong weir; GJ: Gangjeong weir; GM: Gumi weir; HC: Hapcheon dam; HM: Haman weir; HMD: the downstream of Haman weir; HS: Hyeongsan river; IH: Imha dam; ND: Nakdan weir; SJ: Sangju weir; TH: Taehwa river; Avg.: Average

^[b] Q95: Averaged-wet streamflow; Q185: Averaged-normal streamflow; Q355: Averaged-drought streamflow

^[c] GW: ground water; SD: soil depth; FH: forest height; RN: road network; LU: land use

은 모습을 보였다. 다른 유역과 달리 건천화 기여율은 지하수 이용량과 산림높이가 대등한 모습을 보였으며, 토지이용변화가 가장 낮은 기여비율을 보였다. 영산강, 섬진강 유역이 다른 유역에 비해 지하수 이용량의 기여비율이 낮은 이유는 낮은 인구 밀도로 인한 것으로 판단된다. 국정모니터링시스템(e-나라지표, <http://www.index.go.kr/>)의 지역별 인구 및 인구밀도에 따

르면, 2018년 기준 전국 도별 인구밀도는 수도권(서울, 인천, 경기)이 2,165명/km²로 가장 높고, 제주(353명/km²), 경남(318명/km²), 충남(265명/km²), 전북(226명/km²), 충북(219명/km²), 전남(145명/km²), 경북(141명/km²), 강원(90명/km²) 순으로 나타났다. 강원과 경북은 각각 한강과 낙동강 수계로 인구밀도가 높은 수도권과 경남지역과 같은 수계로 연결되어 있고, 강원과

TABLE 6. Analysis results of flow duration changes and contribution rate for stream drying phenomena at Yeongsan and Seomjin river basin

Name ^[a]	Area (km ²)	Flow duration (1980s) (m ³ /s)			Flow duration (2010s) (m ³ /s) (reduction rate, %)			Contribution rate (%) ^[c]				
		Q95 ^[b]	Q185 ^[b]	Q355 ^[b]	Q95	Q185	Q355	GW	SD	FH	RN	LU
DY	47.9	1.55	0.73	0.53	1.41 (-8.8)	0.66 (-10.7)	0.47 (-11.8)	35.6	12.7	32.2	11.9	7.6
GJ	43.6	1.39	0.57	0.39	1.25 (-10.0)	0.51 (-9.8)	0.35 (-10.5)	33.7	9.9	35.9	11.0	9.4
JA	1,029.5	31.1	10.7	4.4	29.6 (-4.6)	9.8 (-8.4)	3.9 (-10.1)	57.2	4.0	28.0	8.6	2.2
JS1	122.9	3.86	1.73	1.23	3.60 (-6.9)	1.58 (-8.6)	1.12 (-8.7)	33.5	12.9	33.5	11.9	8.2
JS2	940.3	31.1	13.2	8.2	29.9 (-3.9)	12.3 (-6.4)	7.5 (-7.6)	32.9	13.9	29.0	14.9	9.3
JS2D	885.6	32.9	13.1	7.3	30.9 (-5.9)	11.7 (-10.7)	6.5 (-11.3)	37.7	12.7	25.6	15.8	8.2
NJ	85.2	2.82	1.26	0.85	2.57 (-8.9)	1.11 (-11.9)	0.75 (-11.8)	24.8	12.5	33.7	15.7	13.3
SC	1,203.6	44.2	20.5	14.0	40.5 (-8.3)	18.9 (-8.2)	12.8 (-8.4)	38.0	13.5	26.5	12.2	9.7
SJ	763.5	27.3	10.2	4.9	26.2 (-3.8)	9.7 (-5.0)	4.6 (-7.6)	40.6	7.1	36.1	11.3	4.9
SJD	3,124.4	109.4	41.8	22.3	106.3 (-2.8)	37.1 (-11.2)	18.2 (-18.2)	34.8	10.8	32.8	13.1	8.6
TJ	505.5	17.5	6.8	3.6	16.7 (-4.9)	6.2 (-8.7)	3.3 (-8.1)	33.9	11.9	31.4	12.9	9.8
Avg.	795.6	27.6	11.0	6.2	26.3 (-6.3)	10.0 (-9.1)	5.4 (-10.4)	36.6	11.1	31.3	12.7	8.3

^[a] SJ: Seomjin river dam; JA: Juam dam; SJD: the downstream of Seomjin and Juam dam; NJ: Naju dam; JS1: Jangseong dam; GJ: Gwangju dam; DY: Damyang dam; SC: Seungchon weir; JS2: Juksan weir; JS2D: the downstream of Juksan weir; TJ: Tamjin river; Avg.: Average

^[b] Q95: Averaged-wet streamflow; Q185: Averaged-normal streamflow; Q355: Averaged-drought streamflow

^[c] GW: ground water; SD: soil depth; FH: forest height; RN: road network; LU: land use

경북을 제외하면 전남이 인구밀도가 제일 낮기 때문에 타 유역보다 지하수 이용량이 낮은 것으로 판단된다.

요약 및 결론

DrySAT-WFT 모형은 하천건천화 원인 규명 및 영향평가를 위해 개발된 분포형 수문 모형으로 시간에 따른 지형의 공간적 변화를 고려할 수 있는 하천건천화 영향요소를 고려할 수 있는 특징이 있다. 본 연구에서는 개발된 DrySAT-WFT 모형으로 유출 검보정을 실시한 뒤 전국 5대강 유역의 댐·보 유역을 대상으로 하천

건천화 영향평가를 실시하였으며 각 건천화 영향요소의 건천화 기여비율을 분석하여 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 선행논문(Jung *et al.*, 2019)에서 8개의 다목적댐(충주댐, 소양강댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 섬진강댐, 주암댐, 용담댐) 및 4개의 유량 관측지점(오수천, 미호천, 마륵, 초강)에 대한 DrySAT-WFT 모형의 검보정 결과 평균 R^2 는 0.76으로 0.66에서 0.84까지의 값을 보였고, 평균 NSE는 0.62로 0.52에서 0.72까지의 값을 나타내었다. 유출 모의결과를 각 지점의 수문곡선과 비교한 결과, 일부 유역에서 첨두유량 값에 차이가 있으나 전반적으로 관측 자료의

유량 변동 경향을 유사하게 재현하는 모습을 보였다.

둘째, DrySAT-WFT 모의 결과를 바탕으로 전국 5대강 유역의 주요 댐·보 유역별 유황의 변화를 분석하고 그에 대한 건천화 영향요소의 기여율을 산정하였다. 한강 유역은 1980년대에 비해 2010년대의 풍수량, 평수량, 갈수량이 약 3%에서 15%로 감소하는 모습을 보였으며, 그 중 갈수량의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다. 대부분의 유역에서 지하수 이용량의 증가가 건천화를 가속시키는데 가장 큰 기여를 한 것으로 나타났으며, 유역 내 산림의 분포가 많은 소양강댐, 충주댐, 춘천댐 유역은 산림높이의 증가가 건천화에 가장 큰 영향을 준 것으로 분석되었다.

셋째, 금강 유역은 한강 유역과 유사한 풍수량, 갈수량 변화를 보였으나, 건천화 기여율은 모든 댐·보 유역에서 지하수 이용량이 가장 큰 기여율을 보였고, 산림높이, 도로망, 토심, 토지 이용 변화의 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다. 세종보와 용담댐 유역의 경우 도로망보다 토심의 변화가 건천화에 더 큰 영향을 준 것으로 분석되었으며, 이는 유역 내 도로망의 분포가 다른 유역에 비해 적기 때문인 것으로 판단된다.

넷째, 낙동강 유역은 풍수량과 갈수량을 비롯한 전체적인 유량이 한강 유역에 비해 낮은 모습을 보였으며, 전반적으로 토지이용 변화가 건천화에 영향력이 가장 작은 것으로 나타났다. 영산강 및 섬진강 유역은 5대강 유역 중 풍수량, 평수량, 갈수량이 가장 낮았으며, 낙동강 유역과 비교해도 절반 정도인 것으로 나타났으며, 토지이용변화가 가장 낮은 기여 비율을 보였다.

하천건천화는 다목적댐과 농업용 지하수 등 주로 지표수를 활용하고 있는 우리나라 수자원 시스템에 매우 위협적인 현상이며, 물 수요량은 기존 생공농업용수와 더불어 환경을 감안한 생태유량까지 계속 증가하고 있는 실정이다. 그동안 다양한 연구기관을 통해 건천조사에 대해 연구가 이뤄진 바 있으나, 어떠한 요인이 얼마나 건천화에 영향을 주고 있는지에 대한 정량적인 원인구명은 어려운 실정이었다. 본 연구에서는

5개 하천건천화 영향요소를 대상으로 과거로부터 수십년간의 시공간적 변화과정을 전국적으로 분석하고 제시하였으며, 이러한 연구결과가 다양한 수자원/환경분야 연구 및 수자원 정책방향 및 대응방향 수립에 일조할 수 있기를 기대한다. **KAGIS**

REFERENCES

- Gyeonggi Research Institute(GRI). 2003. A study on the prevention of drying streamflows in Kyonggi-do: 147-152 (경기개발연구원, 2003. 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구: 147-152).
- Jung, C.G., J.W. Lee, Y.G. Lee and S.J. Kim. 2019. Quantification of stream drying phenomena using grid-based hydrological modeling via long-term data mining throughout South Korea including ungauged areas. *Water* 11(3):477.
- Jung, C.G., W.J. Jang and S.J. Kim. 2016. Spatial rainfall considering elevation and estimation of rain erosivity factor R in revised USLE using 1 minute rainfall data and program development. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(4):130-145 (정충길, 장원진, 김성준. 2016. 고도를 고려한 공간강우분포화 1분 강우자료를 이용한 RUSLE의 강우침식인자(R) 산정 및 프로그램 개발. *한국지리정보학회지* 19(4):130-145).
- Jung, K.S., H.S. Cho, J.Y. Kim and M.P. Shim. 2003. Analysis of drying streams characteristics using a GIS. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(6):1083-1095 (정관수, 조효섭, 김정엽, 심명필. 2003. GIS를 이용한 건천화 하천의 특성분석. *한국수자원학회논문집* 36(6):1083-1095).

- Lee, J.W., Y.G. Lee and S.J. Kim. 2017. The possibility of drought expression by late march dryness in rice paddy areas using terra MODIS NDVI. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 20(3):27-41 (이지완, 이용관, 김성준. 2017. Terra MODIS NDVI를 활용한 3월말 논지역 건조상태에 따른 가뭄표현 가능성 연구. *한국지리정보학회지* 20(3):27-41).
- Lee, K.S., E.S. Chung and Y.O. Kim. 2006. Integrated approach for watershed management in an urban area. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(2):161-178 (이길성, 정은성, 김영오. 2006. 도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근 방법. *한국수자원학회논문집* 39(2):1083-1095).
- Lee, S.H., J.P. Park, J.M. Lee and H.S. Cho. 2003. A cause analysis on the reduction of stream flow for the Cheongdocheon. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(6):1067-1080 (이상호, 박종표, 이정민, 조효섭. 2003. 청도천의 건천화 원인분석. *한국수자원학회논문집* 36(6): 1067-1080).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea(MLTM), 2009. Study on evaluation and improvement of streamflows drying: 3-34-3-49 (국토해양부, 2009. 하천건천화 평가 및 개선방안 연구: 3-34-3-49).
- Ministry of Science and Technology of Korea(MST). 2003. The 21st century frontier R&D program -sustainable water resources research center -technology of sustainable surfacewater development: 938-942 (과학기술부. 2003. 21세기 프론티어연구개발사업 -수자원의 지속적 확보기술 개발사업 -지속가능한 하천수 개발 기술: 938-942).
- Nash, J.E. and J.E. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting though conceptual models: Part I, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):282-290.
- Park, Y.S., H.S. Jung, Y.S. Shin and J.M. Hong. 2001. Prevention measures for stream drying of Dorim-cheon. *Korea Institute for Environmental and Social Policy*: 14-15 (박영숙, 정홍식, 신예섭, 홍정민. 2001. 도림천 건천화 방지대책. *한국환경사회정책연구소*: 14-15).
- Rural Research Institute(RRI). 2006. A study on causative factors of drying stream in rural area. *Korea Rural Community Corporation*: 89-90 (농어촌연구원. 2006. 농촌지역 소하천의 건천화 원인 분석을 위한 실태 조사. *한국농어촌공사*: 89-90).
- Seo, Y.M., Y.M. Lee, S.Y. Lee, H.K. Jee and S.T. Lee. 2004. Restoration technics of aquatic ecosystem for stream through alluvium. *Annual Conference of the Korea Water Resources Association*, 1340-1344 (서영민, 이영민, 이승윤, 지흥기, 이순탁. 2004. 충적층을 통과하는 소하천 수중생태계 복원기법. *한국수자원학회 2004년도 학술발표회*: 1340-1344).
- Yi, C.S., S.A. Choi, H.S. Kim and M.P. Shim. 2004. Cause analysis on dry of stream flow for the Ui-Cheon. *Annual Conference of the Korea Water Resources Association*, 753-758 (이충성, 최승안, 김형수, 심명필. 2004. 우이천의 건천화 원인분석. *한국수자원학회 2004년도 학술발표회*: 753-758쪽).

Yoo, J.H., K.H. Kim, Y.G. Park, G.H. Lee, S.J. Kim and C.H. Jung. 2018. A study on the use of GIS-based time series spatial data for streamflow depletion assessment. Journal of the Korean Association of Geographic Information

Studies 21(4):50-63 (유재현, 김계현, 박용길, 이기훈, 김성준, 정충길. 2018. 하천 건천화 평가를 위한 GIS 기반의 시계열 공간자료 활용에 관한 연구. 한국지리정보학회지 21(4):50-63). **KAGIS**