

하천 건천화 평가를 위한 GIS 기반의 시계열 공간자료 활용에 관한 연구

유재현¹·김계현^{1*}·박용길¹·이기훈¹·김성준²·정충길³

A Study on the Use of GIS-based Time Series Spatial Data for Streamflow Depletion Assessment

Jae-Hyun YOO¹·Kye-Hyun KIM^{1*}·Yong-Gil PARK¹
Gi-Hun LEE¹·Seong-Joon KIM²·Chung-Gil JUNG²

요 약

급격한 도시화를 겪으면서 자연적인 물순환 체계의 왜곡을 초래하였다. 이러한 물순환 구조의 변화는 기존 수자원 이용 경향을 변화시키며 하천 건천화 현상을 유발하고 있다. 이를 관리하기 위해 건천화 평가 및 예측이 가능한 하천 건천화 영향 평가 기술이 필요하다. 하천 건천화 영향평가 기술 수행을 위해서는 기초자료로써 GIS 기반의 공간자료 구축이 필수적이거나, 관련 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하천 건천화 평가를 위한 GIS 기반의 시계열 공간자료 활용에 대한 연구를 수행하였다. 이에 6개 하천 건천화 영향요소(기상, 토심, 산림밀도 및 높이, 도로망, 지하수 이용량, 토지이용)을 대상으로, 과거 수십년 간의 변화과정을 전국 단위 GIS 자료로 구축하여 연속수문모형 운용에 대한 기초자료로 활용하였다. 이러한 영향요소를 대상으로 시계열에 따라 하천 건천화 원인을 분석하고 해석할 수 있는 분포형 연속수문모형 기반의 DrySAT을 활용하여 하천 건천화 영향요소별 연유출량 및 건천화 평가를 수행하였다. 그 결과, 다른 요소들은 고려하지 않고 주어진 기상 조건하에 연유출량은 기본값 977.9mm로 산출되었다. 반면, 토심 감소, 산림 높이 증가, 도로 개발 증가, 지하수이용량 증가, 토지이용 개발변화를 고려하였을 때의 연평균 유출량은 각각 1,003.5mm, 942.1mm, 961.9mm, 915.5mm, 1003.7mm로 산출되었다. 산출된 결과는 하천건천화의 주요 원인으로 지표유출량을 증가시켜 하천유량을 감소시키는 토심의 감소, 지표유출량을 감소시키는 산림 밀도의 증가, 지표하유출량을 감소시키는 도로의 증가, 기저유출량을 감소시키는 무분별한 지하수 개발과 지하수이용량의 증가, 지표유출량을 증가시키는 불투수지역의 증가를 들 수 있다. 또한, 하천 건천화 정의 및 등급 범위를 통해서 건천화 등급에 따라 표준유역별로 나타내었으며, 기상, 토심 감소 고려, 산림 높이 증가, 도로 개발 증가, 지하수이용량 증가, 토지이용 개발변화를 고려하였을 때의 건천화 등급은 각각 2.1, 2.2, 2.5, 2.3, 2.8, 2.2로 나타났

2018년 10월 05일 접수 Received on October 05, 2018 / 2018년 11월 20일 수정 Revised on November 20, 2018 / 2018년 11월 21일 심사완료 Accepted on November 21, 2018

* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구지원비(18-AWMP-B079625-05)에 의해 수행되었습니다.

1 인하대학교 공간정보공학과 Dept. of Geoinformatic Engineering Inha University

2 건국대학교 사회환경공학부 School of civil and Environmental Engineering Konkuk university

3. 건국대학교 사회환경플랜트공학과 Dept. of civil and Environmental and plant Engineering Konkuk university

※ Corresponding Author E-mail : kye Hyun@inha.ac.kr

다. 기본값인 강우조건을 제외한 5개 하천 건천화 영향요소에 대한 건천화 영향순위는 지하수 이용량 변화에 대한 건천화 영향이 제일 컸으며, 산림 밀도 변화, 도로 건설 변화, 토지이용 변화 및 토심 변화 순으로 나타났다. 향후 전국 하천 건천화 평가시스템 개발을 통해 6개 하천 건천화 영향요소에 대한 미래 자료 변화 및 이에 대한 건천화의 진행전망 등 시스템에 의한 평가결과를 토대로 맞춤형 하천 건천 관리 및 방지 방안을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : GIS, 하천 건천화, DrySAT, 영향평가

ABSTRACT

The rapid urbanization had led to a distortion of natural hydrological cycle system. The change in hydrological cycle structure is causing streamflow depletion, changing the existing use tendency of water resources. To manage such phenomena, a streamflow depletion impact assessment technology to forecast depletion is required. For performing such technology, it is indispensable to build GIS-based spatial data as fundamental data, but there is a shortage of related research. Therefore, this study was conducted to use the use of GIS-based time series spatial data for streamflow depletion assessment. For this study, GIS data over decades of changes on a national scale were constructed, targeting 6 streamflow depletion impact factors (weather, soil depth, forest density, road network, groundwater usage and landuse) and the data were used as the basic data for the operation of continuous hydrologic model. Focusing on these impact factors, the causes for streamflow depletion were analyzed depending on time series. Then, using distributed continuous hydrologic model based DrySAT, annual runoff of each streamflow depletion impact factor was measured and depletion assessment was conducted. As a result, the default value of annual runoff was measured at 977.9mm under the given weather condition without considering other factors. When considering the decrease in soil depth, the increase in forest density, road development, and groundwater usage, along with the change in land use and development, and annual runoff were measured at 1,003.5mm, 942.1mm, 961.9mm, 915.5mm, and 1003.7mm, respectively. The results showed that the major causes of the streamflow depletion were lowered soil depth to decrease the infiltration volume and surface runoff thereby decreasing streamflow; the increased forest density to decrease surface runoff; the increased road network to decrease the sub-surface flow; the increased groundwater use from indiscriminated development to decrease the baseflow; increased impervious areas to increase surface runoff. Also, each standard watershed depending on the grade of depletion was indicated, based on the definition of streamflow depletion and the range of grade. Considering the weather, the decrease in soil depth, the increase in forest density, road development, and groundwater usage, and the change in land use and development, the grade of depletion were 2.1, 2.2, 2.5, 2.3, 2.8, 2.2, respectively. Among the five streamflow depletion impact factors except rainfall condition, the change in groundwater usage showed the biggest influence on depletion, followed by the change in forest density, road construction, land use, and soil depth. In conclusion, it is anticipated that a national streamflow depletion assessment system to be develop in the future would provide customized depletion management and prevention plans based on the system assessment

results regarding future data changes of the six streamflow depletion impact factors and the prospect of depletion progress.

KEYWORDS : GIS, Streamflow Depletion, DrySAT, Impact Factors Assessment

서 론

우리나라의 도시들은 과거 급격한 도시화를 겪으면서 방재, 안전의 개념이 도시개발에 충분히 반영되지 못했을 뿐만 아니라, 개발에 따른 강수, 침투, 유출 등으로 이어지는 자연적인 물순환 체계의 왜곡을 초래하였다(Barnes *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2002 ; Lee, 2008). 이러한 물순환 구조의 변화는 기존 수자원 이용 경향을 변화시키며 하천 건천화 현상을 유발하고 있다. 또한, 산업화 과정을 거치면서 물 수요량이 급증하게 되었고 이는 증소하천 건천화의 주요한 원인 중 하나로 추측되고 있다(Jeon *et al.*, 2012 ; Yoo *et al.*, 2014). 하천 건천화는 교육과학기술부의 21세기 프런티어 연구개발사업의 일환으로 ‘지속가능한 하천수 개발기술’에서 최초로 조사되었고, 지방 2급 하천 3,773개 중 543개 하천이 건천화가 된 것으로 보고되었다(MST, 2003). 이를 해결하기 위한 하천 건천화 평가 분석 기법은 단일화 되어있거나 정형화 되어있지 않은 채로 진행된 연구가 대부분이었다. 대표적인 연구사례로는 지속가능한 하천수 개발 기술(MST, 2003), 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구(GRI, 2003), 안양천 유역의 물순환 건천화 기술개발(MST, 2007), 하천 건천화 평가 및 개선방안(MLTM, 2009), 도시 하천의 건천화 방지를 위한 물순환 건천화 대책(NARS, 2010)등을 들 수 있다. 이들 연구에서는 건천화에 영향을 주는 건천화의 원인을 분석하여 크게 자연적 요소와 인위적 요소 2가지로 나누고, 인위적 요소 중 하천수 이용, 하천시설물 운영방법, 지하수 이용 및 토지이용 요소가 건천화에 정량적으로 어떠한 영향을 주는지 평가하는 방안을 제시하였다.

또한, Jung *et al.*(2003)은 수문자료와 하천

의 연장 및 유역면적, 지역별 특성에 대한 선정 기준을 수립하여 8개의 대상하천을 선정한 후 GIS를 이용하여 건천화 하천의 구간에 대한 경사분석, 건천화 하천의 사행도 등의 건천화 하천의 특성을 분석하였다. Yi *et al.*(2004)은 반분포형 유출모형인 TOPMODEL을 활용하여 장기유출 분석, 수문·기상자료에 의한 분석, 인문·사회 자료의 분석, 지하수위 분석 등 4가지 방법으로 원인분석을 수행하였다. 이 연구에서는 건천화 원인의 제거보다는 인위적인 수량확보를 위한 기술 적용 및 확대가 필요하다는 것을 확인하였으며, 건천화 방지대책도 제시하였다. Kim *et al.*(2005)는 경안천 본류와 지류의 유량자료를 이용하여 갈수기와 풍수기의 유량을 비교함으로써 경안천 건천화 정도를 확인하였으며, 갈수기와 풍수기의 차이가 클수록 건천화 정도가 심하다고 판단하였으며, 인근 도시의 10년간 인구자료, 토지이용현황, 연도별 지하수 이용량, 강우자료를 조사하여 분석함으로써 지류의 건천화 및 본류에 미치는 영향을 파악하였다.

이러한 평가 분석 기법들은 특정 시기에 특정 지점에서의 특정 유량기준을 만족하는지에 대한 평가 위주의 1차원적인 해석만이 가능하였으며, 하천 건천화 원인들의 시·공간적 원인 규명이 이루어지지 않았다. 증소하천의 관리 주체는 기본적으로 지방자치단체에 있으나, 인력 및 예산을 고려했을 때 하천 건천화를 예방하고 관리할 수 있는 인프라 구축이 매우 미진하거나 형식적으로만 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 하천 건천화를 해결하기 위하여 다양한 연구 사업의 추진을 통하여 합리적인 의사결정을 뒷받침할 수 있는 실시간 평가 및 예측이 가능한 하천 건천화 영향 평가 기술의 개발이 필수적이다. 이러한 하천 건천화 영향 평가 기술을 수행하기 위해서는 수문학적으로 하천 건

천화를 해석하고 시·공간적 원인을 규명하기 위한 시계열 GIS 공간자료 확보가 필수적이나, 관련 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 산림높이, 지하수, 도로, 토지이용, 기상, 토심 등 전국단위 하천 건천화 모형의 6개 입력자료를 제공하는 시계열 공간자료를 구축하고, 시계열 변화에 따라 어떻게 변화되는지를 분석하고 고찰하였다. 또한, 분포형 연속수문모형 기반의 DrySAT(Grid-based Drying Streamflow Assessment Tool)을 활용하여 하천 건천화 원인 해석을 위한 영향요소별 연유출량 결과를 분석하였다. 이 결과를 통하여 등급화 지수를 통한 결과를 제시하였으며, DrySAT 결과를 GIS 기반 시계열 하천 건천화 공간자료와 변화 추이를 비교하였다. 나아가 6개의 하천건천화 영향요소가 전국단위 하천 건천화에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 고찰하였다.

연구 방법

1. 건천화의 정의 및 원인

건천이란 연구자에 따라서 다른 기준으로 정의될 수 있지만 인문사회학적으로 국어사전에 “조금만 가물어도 이내 물이 마르는 하천”으로 정의되어 있다. GRI(2003)에서는 “하천의 건천화는 하천의 바닥이 보일 정도로 거의 메말

라 있는 현상”이라고 기술하고 있으며, Jung *et al.*(2003)은 “건천은 자연적인 기능을 유지할 수 없도록 악화되고 있거나 이미 악화된 하천으로서, 수문학적 기준으로 갈수량 기준 이하이거나 하천기능을 유지하기 위해 필요한 수량을 지속적으로 제공할 수 없는 하천”으로 정의하였다.

즉, 건천이란 자연적 기능을 유지할 수 없을 만큼의 유량과 그 유량이 발생하는 기간에 의해 결정된다고 할 수 있으며, 하천건천화란 자연상태의 하천 성질이 여러 원인으로 인해 건천의 조건을 만족하는 성질로 그 상태가 변화하는 것이라 할 수 있다. 주요 원인은 주로 도시개발로 인한 불투수면적의 증가, 무분별한 지하수 개발 및 하천수의 이용 급증, 하천 시설물의 증가, 하도 및 유역의 자연적 특성으로 구분할 수 있다(표 1).

2. 하천 건천화 기준유량 결정 및 평가지표 정의

본 연구에서는 건천화 판단을 위한 기준유량을 결정하기 위해서 하천건천화 평가 및 개선방안(MLTM, 2009)을 참조하였으며, 건천화 기준유량을 결정하기 위해서 표 2와 같이 3가지 방법을 검토하였다. 기준유량은 기존에 갈수량으로 많이 사용되고 있는 10일 연속 최소유량을 기준유량으로 선정하였다.

TABLE 1. Major causes of stream depletion

Causes	Description
Increasing use of stream water and underground water	- Increasing intake water volume of stream water due to increasing amounts of using agricultural water, industrial water, and residential water - Decreasing base flow because of using underground water
Increasing stream facilities	- Prohibit spill on dam built in the upper stream - Prohibit stream water due to building reservoir
Change of soil attributes in watershed	- Loss of undercurrent function of stream due to sediment - Loss of soil water content function due to diminishing effective soil depth
Urbanization nearby watershed	- Reduce underground level due to increasing impervious areas (cities nearby stream and road network, etc.) - Increasing amounts of using water due to urbanization and rising population - Increasing outflow speed due to stream strengthening
Forest change	- Rising evapotranspiration directly affecting outflow due to mounting forests
Natural characteristics of stream and watershed	- Highly pervious riverbed materials such as sand and pebbel - Topographical characteristics such as steep watershed slope

TABLE 2. Methods of determining stream depletion standard outflow

Division	Applicability
Method of analyzing reliability of the mean difference in field measured outflow	<ul style="list-style-type: none"> - If there is a reliable long-term observation data, divide data periods based on the time considered as stream depletion began. - Consider the reliability, compare the characteristics of individually analyzed sulfur, and determine limits of significance on the difference of outflow with standard outflow of the certain stream
Method of comparing the characteristics of sulfur in simulated natural outflow with field measured outflow	<ul style="list-style-type: none"> - Compare natural outflow simulated by hydrological model with the characteristics of sulfur of field measured outflow in which results from watershed development and water use were reflected. - In case of above the certain percentage of sulfur difference (E.g. 10~20%), determine outflow with stream depletion standard outflow
Method of assessing outflow durations less than mean rainfall	<ul style="list-style-type: none"> - Analyze sulfur eliminating artificial development of change of waterside environment either in simulated natural outflow or field measured outflow - Determine the mean decade defined as the mean figures for at least ten days as standard outflow of analyzed daily outflow

TABLE 3. Assessment standard of stream depletion

Stream depletion progress (D)	Condition	Stream depletion Index	Range
$D \leq 10$	Normal	1	1.0-1.5
$10 < D \leq 30$	Weak	2	1.6-2.4
$30 < D \leq 60$	Warningl	3	2.5-3.4
$60 < D \leq 90$	Severe	4	3.5-4.4
$90 < D$	very severe	5	4.5-5.0

또한, 하천 건천화의 정도를 평가하기 위해서는 평가지표가 필요하다. MLTM(2009)와 Jeon *et al.*(2012)의 기존 연구사례로 미루어 실제 하천의 건천화에 기여하는 영향인자들과의 상호관계는 매우 복잡하기 때문에 모든 영향인자들을 직접적으로 이용하여 건천화 등급을 분류하는 것은 어려운 실정이다. 따라서 건천화 일수에 따른 지표화가 필요하였으며, 건천화 상태를 개략적으로 표현하기 위한 건천화 등급 적용하였다. 본 연구에서는 6개 하천 건천화 영향요소를 대상으로 기준 유량의 이하로 떨어지는 일수를 가지고 건천화의 정도를 표 3과 같이 5가지로 등급화 하였다.

3. 하천 건천화 원인추적 및 영향평가용 분포형 연속수문모형 DrySAT

DrySAT은 기존에 존재하는 PGA-CC(Projection of Hydrology via the Grid-based Assessment for Climate Change)를 기반으로 하천 건천화

해석을 위해 새롭게 개발된 모형으로, 1km의 해상도로 한반도 전반에 대하여 하천 건천화 원인 규명 및 영향평가를 하는 것이 주목적이다. 주요 입력자료로는 6개의 하천 건천화 영향요소(산림높이, 지하수, 도로, 토지이용, 기상, 토심)이다. 모형의 개선 사항으로는 하천건천화 원인 추적 및 평가를 위한 입력자료의 전처리, 출력자료의 후처리 기능이 강화되었으며, 모형의 구조는 그림 1과 같으며, DrySAT의 운영 프로세스는 그림 2와 같다.

특히 DrySAT 모형의 가장 큰 특징은 지형 조건의 시간에 따른 공간적 변화에 따른 하천 건천화 원인추적 시나리오를 고려할 수 있다는 것이다. 모형을 활용하여 하천 건천화 원인추적을 할 수 있는 시나리오는 산림분포변화, 유효 토심변화, 토지이용 및 전국도로망변화, 지하수 변화를 활용하는 방법이 있다.

산림분포변화는 한국전쟁 이후 파괴되었던 산림의 회복으로 인해 증발산 및 토양 수분 등에 영향을 미치게 되었으며, 이에 따라 하천으로

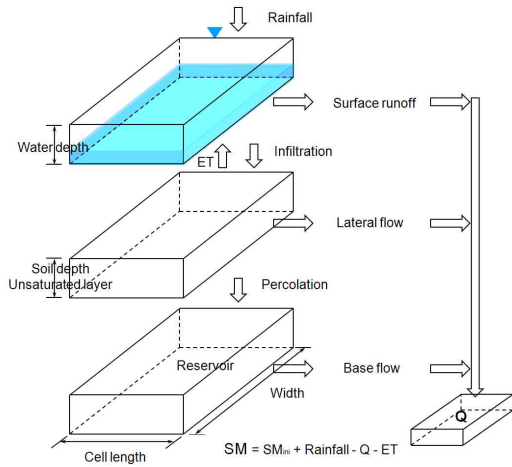


FIGURE 1. DrySAT model structure

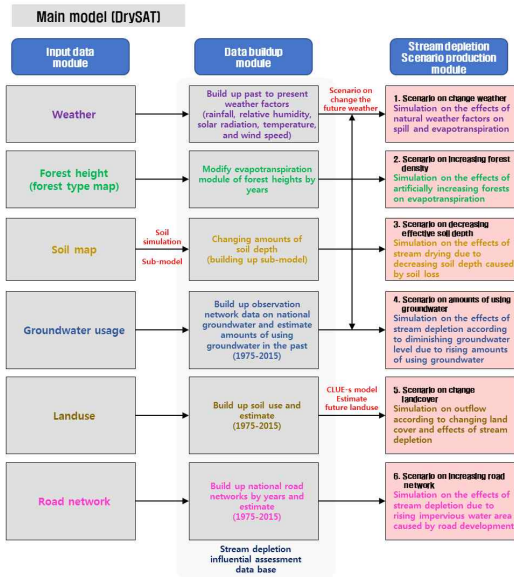


FIGURE 2. Process of DrySAT operation

유입되는 유량이 변동됨으로 역추적에 활용할 수 있다. 토양 유실에 따른 유효토심변화는 토양수분 보유량을 변화시키고, 이는 지표하유출량과 침투 현상에 영향을 주어 하천유량의 변동을 확인하는데 활용할 수 있다. 또한, 급격한 경제개발과 도시화로 인해 불투수층(도시 및 도로망) 증가로, 불투수층에서의 유출은 모두 회귀량이 없는 직접유출(우기)이거나 증발(건기)이 되

므로 이곳의 지표하유출량은 '0' 이라는 것에 활용할 수 있다. 마지막으로 무분별한 지하수 이용에 따라 지하수 이용량이 충전량 보다 커지게 되어 지하수위가 감소하게 되고, 감소한 지하수위는 하천유량에 영향을 확인하는데 활용할 수 있다.

4. GIS 자료 수집 및 구축 방법

하천건천화 원인 구명을 위하여, 6개의 하천 건천화 영향요소에 대한 주요 데이터 현황 조사를 표 4와 같이 정리하였으며, GIS 자료를 구축하기 위한 방법을 정의하였다(그림 3). GIS 자료 편집 및 구축을 위해 ArcGIS Desktop 10.2를 사용하였다.

1) 산림분포 및 높이

산림의 상태는 증발산량, 산림 지하수 자원 등에 밀접한 관계가 있기 때문에 하천 건천화의 주요 영향요소이다. 관련 자료를 수집하기 위해 산림의 상태를 파악하기 용이한 GIS 기반 자료인 임상도와 산림의 나이 및 지위지수를 제공하는 임분수확표 및 산림자원 관리지침 현황을 파악하였다. 임상도의 경우 산림청에서 운영하는 산림 GIS 포털(FGIS)에서 자료를 수집하였으며, 임분수확표와 산림자원 관리지침은 국립산림과학원에서 자료를 수집하였다.

임상도 속성 내 임상 구분에 대한 산림 나이 정보를 분류하였고, 임분수확표 내 산림 나이에 대한 지위지수 선정을 통해 지위지수에 따른 산림 높이를 산정하였다. 임상도는 구축기간에 따라 1~5차 임상도가 존재하며, ArcGIS 필드 추가 과정을 통해 차수별 임상도 내 속성자료에 각각 산림 높이 필드를 추가하였다. 지위지수 선정을 통해 지위지수에 따른 산림높이 속성정보를 입력하였으며, 1975~2015년까지의 시계열 산림 밀도 및 산림 높이 자료를 구축하였다.

2) 전국 도로망

도로의 구축은 불투수면 증가에 따른 물 순환 변화와 밀접한 관련이 있기 때문에 하천 건천화

TABLE 4. Current status of major data on influential factor of stream depletion

	Forest height	Road network	Groundwater usage	Landuse	weather data
Establishment organization	Korea Forest Service	Korea Traffic Portal/Korea Expressway Corporation	Ministry of Land, Infrastructure, and Transport(MOLIT) /K-water	Ministry of Environment(MOE) /Ministry of Land, Infrastructure, and Transport(MOLIT)	Korea Meteorological Administration
Major current situation	<ul style="list-style-type: none"> - Provide information on land use and forest height by producing forest type map - Analyze the pattern of forest areas and variations in growing stocks bey years based on basic forest statistics 	<ul style="list-style-type: none"> - Provide road data from national traffic DB - Provide current status of building expressways and ordinary national roads by years 	<ul style="list-style-type: none"> - General management of underground water quantities - Install and operate national underground observation network - Statistics on current use by operating national sewage information center 	<ul style="list-style-type: none"> - Offer information on the current status of land use by producing land coverage - Offer time series information based on the current status of production by years 	<ul style="list-style-type: none"> - Provide 30 different data such as ground, marine, air observation, and satellite - Search and provide weather data through regions and weather factors
Authorities	Information Technology and Statistics Officer room at Korea Forest Service	Korea Transport Institute	National Underground Water Information Center	Information Officer room at the Ministry of Environment	Information Technology and Statistics Officer room at Korea Meteorological Administration

의 주요 영향요소이다. 도로망도는 모든 도로에 대한 중심선과 절점, 도로번호, 차선 수 등 도로 관련 정보를 포함하고 있으며, 한국교통연구원에서 운영하는 국가교통 포털에서 05~15년까지 전국 도로망도 자료를 수집하였다. 또한, 한국도로공사와 지방국토관리청에서 제공하는 고속도로, 국도 현황정보 및 연혁 정보와 도로 건설관리 계획 및 보고서 자료 수집을 통해 시계열별 도로 구축 현황을 정리하였다. 이를 통해 과거 구축된 도로를 파악하였다. 본 연구에서는 수집된 2005년 도로망도 자료 편집을 위해 ArcGIS Editing 기능을 활용하였으며, 시계열별 도로 구축 현황을 토대로 도로를 구간별 Feature로 분할하였으며, 1975~ 2015년까지의 시계열 도로망도를 구축하였다.

3) 지하수 이용량

지하수 이용량은 무분별한 지하수 사용량과 하천 수위와의 밀접한 관련이 있기 때문에 하천 건천화의 주요 영향요소이다. 지하수 이용량은

한국수자원공사에서 운영하는 국가지하수정보센터에서 제공되는 지하수 연보를 통해 지하수 이용량자료를 수집하였으며, 시군구 단위 지역별, 용도별, 월별 지하수 이용량 확인이 가능하였다. 지자체 지하수 관리 기본계획보고서에서 제공되는 지하수 이용추이 분석 자료를 통해 연평균 증감률 확인하였으며, 월별 지하수 이용량 비율 변화와 같이 정리하였다. 정리된 속성정보를 ArcGIS Data Join 과정을 통해 입력함으로서 유역도 도형정보와 연계하였으며, 1975~2015년까지의 시계열 지하수 이용량 자료를 구축하였다.

4) 토지이용

토지이용은 지표면의 이용현상을 가장 잘 반영하기 때문에 하천 건천화를 파악하는데 중요한 영향요소이다. 환경부에서 운영하는 환경공간정보서비스에서 제공하는 중분류 토지피복도를 수집하였다. 중분류 토지피복도는 2000년~2015년까지 4~5년 주기로 전국 단위 제작

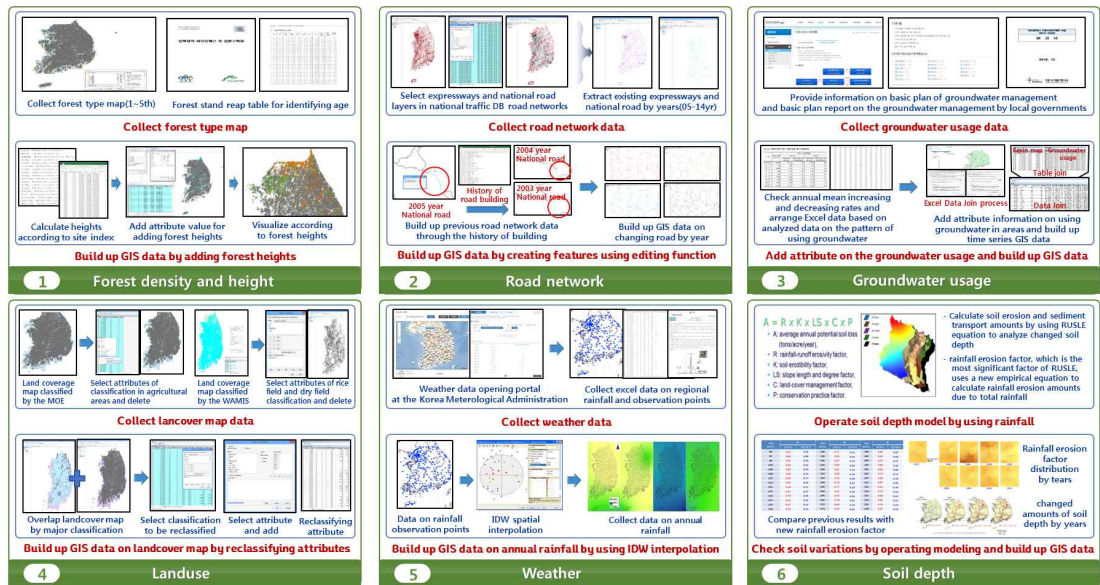


FIGURE 3. Definition of GIS data building methods on stream depletion

이 되어있다. 또한, 농경도시가 점점 도시화로 변함에 따라 투수면적인 중분류 항목의 논, 밭 변화가 존재하는 토지피복도 확보가 필요하였다.

1980년~2000년까지 중분류 단위 토지피복도가 존재하지 않았으므로, 환경부에서 제공되는 대분류 토지피복도를 기반으로 GIS 자료를 중첩분석하였다. 환경부에서 제공되는 대분류 토지피복도 분류체계는 7개 항목으로 시가화·건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역으로 분류된다. 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공되는 대분류 토지피복도 분류체계는 8개 항목으로 시가화, 논, 밭, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역으로 분류된다. 이는 대분류 토지피복도임에도 불구하고 농업지역이 분류가 되어있었다. 이에 ArcGIS Merge 기능을 활용하여 환경부에서 제공되는 대분류 토지피복도의 농업지역과 WAMIS에서 제공하는 논, 밭 속성을 중첩시켰으며, 중첩된 면적에 한하여 속성을 재분류 하였다. 농업지역인 분류코드 '200' 을 논 '210', 밭 '220' 으로 속성 분류코드를 변경시켰으며, 1975년~2015년까지 시계열 토지이용 자료를 구축하였다.

5) 기상

기상 요소 중 강우량은 우기의 하천 유출률 증가와 건기의 지하수위 저하에 밀접한 관련이 있기 때문에 하천 건천화를 심화시키는 주요 영향요소이다. 기상 자료는 관측 방식에 따라 지상, 해양, 고층, 항공관측, 위성, 레이더 등 총 30종류의 자료가 있으며 해당 자료의 구축이 가능한 지역에 대해서 기온, 강수량 등 다양한 기상요소가 존재한다. 이러한 자료들을 사용자의 요구에 맞게 획득할 수 있으며 기상청에서 운영하는 기상자료개방포털에서 기간별, 지역별 강우량에 대한 자료를 수집하였다. 수집된 자료를 IDW보간법(Inverse Distance Weighted Interpolation)을 사용하여 관측 값이 없는 지역에 대한 보간을 수행하여 1975년~2015년까지의 시계열 연강우량 자료를 구축하였다.

6) 토심

토심의 감소는 토양수분을 감소시키고 침투유량을 증가시킴으로 가뭄 및 홍수에 더 큰 영향을 미치게 되어 하천 건천화의 주요 영향요소이다. 토심의 변화를 분석하기 위해 수정범용도양

유실방정식(RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation)에서 제시한 Sediment delivery 공식을 이용하여 토양침식모델링을 활용하여 토양침식량 및 유사이송량을 산정하였다.

RUSLE의 가장 중요한 인자에 해당하는 강우침식인자는 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.

전국 강우침식량의 산정결과로부터 1975년~2015년까지의 토양침식량을 산정하였고 이에따른 전국 토심변화를 산정하였으며, 시계열 토심 자료를 구축하였다.

연구 결과 및 고찰

1. 하천 건천화 영향요소 GIS 자료 수집 결과

지난 수십년 동안 하천 건천화의 진행에 대한 영향을 미친 요소로서, '산림높이, 도로망, 지하수 이용량, 토지이용, 토심, 기상'의 6개 요소를 선정하고, 이들에 대한 과거 기상자료, 기상

자료를 이용한 RUSLE 토양침식모델링 결과, 과거 임상도, 과거 도로망도, 과거 지하수 이용량 통계, WAMIS 및 환경부 토지피복도를 활용하여 그림 4와 같이 1975년~ 2015년까지의 각 10년 단위의 시계열 전국 자료를 수집하였다.

산림높이의 경우, 간벌 후 갈수기 유출량은 간벌 전보다 약 2.3배 이상 높게 나타났으며, 이는 간벌에 의해 증발산량이 증가했기 때문으로 분석된다. 이를 토대로 산림높이가 증가하면 하천 갈수량은 감소할 것으로 추측되므로 하천 건천화의 주요 요인으로 분석되었다.

도로망의 경우 도시화가 급속히 진전되면서 홍수방지 차원에서 정비되어 왔고 도시의 과밀화 문제를 해소하는 수단으로 도로, 건물 등으로 전용으로 사용하기 위해 전면 혹은 부분이 복개되어 졌으며, 이러한 복개하천은 유수의 정상적인 흐름을 방해함으로써 하천 건천화의 주요 요인으로 분석되었다. 현재 우리나라 도로는 총 107,527km이며, 이 중 고속도로 연장의 경우 2015년 4,365km로 전체 4.1%에 해당되며, 연평균 3.4%가 증가하였다. 국도의 경우 2015년에 13,930km으로 전체 13%에 해당되며, 연

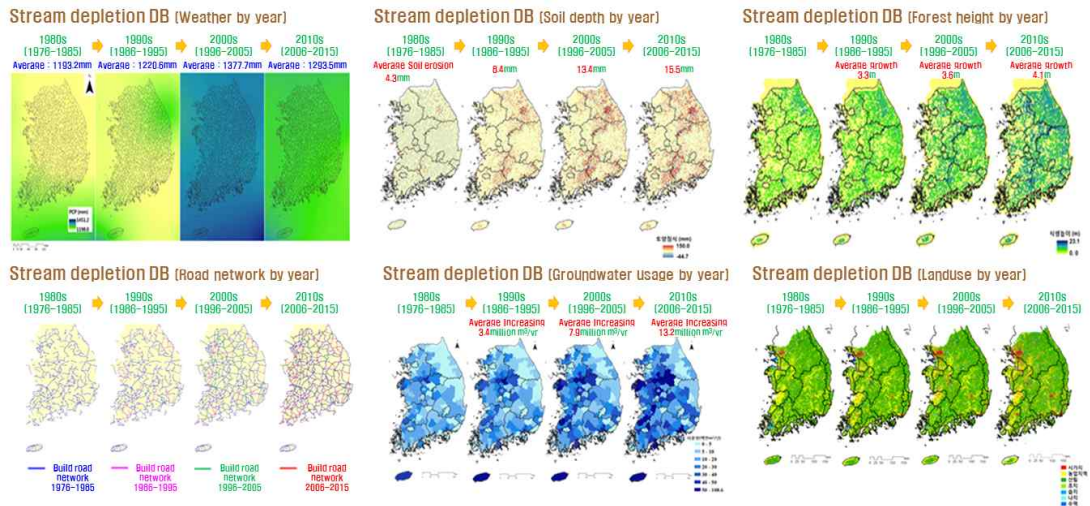


FIGURE 4. Results from collecting time series GIS spatial data according to influential factors of stream depletion

평균 0.47%가 증가하였다.

지하수 이용량의 경우 도시화로 인한 불투수지역의 확대로 용수 사용량 증가 및 무분별한 지하수 개발 등으로 인한 지하수위 및 하천수위의 저하, 하수보급률 증가로 인한 하천 유량감소 등으로 하천 건천화의 주요 요인으로 분석되었다. 지하수 이용량의 경우 1975년 1,615 백만 m^3 /년에서 2015년 4,514백만 m^3 /년으로 점차적으로 연간 2.9%의 증가율을 보였다.

토지이용의 경우 도시성장에 따른 토지이용변화, 즉 산림이나 농지가 도시용도로 전환되는 현상은 기후변화, 하천 건천화 등 지속적인 개발과 연관이 있으므로 하천 건천화의 주요 요인으로 분석되었다. 도시화 현상은 80년대에는 도시화율 69.7%를 보였으며, 2000년대 82.6%로 가파르게 상승하는 현상을 보였다.

2. 하천 건천화 영향요소별 연유출량 결과

결과 도출을 위하여 DrySAT은 전국 다지점

을 대상으로 실측 증발산량(3개 지점), 토양수분(36개 지점) 및 유출량(12개 지점)에 대한 검토정을 실시하였다. 이를 위해 전국 유량 관측소중 상류 구조물에 대한 영향을 받지 않고 자연유량의 관측이 이루어지고 있는 유량 관측소 지점을 선정하였다. 적용성 평가지수로 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수(R^2)와 모델의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe가 제안한 모델 효율성계수(NSE)를 사용하였다. 유출모의결과 R^2 는 0.50~0.89, NSE는 0.47~0.86으로 실측 유출량과의 유의성이 높은 것으로 나타났으며, 중권역 단위에서의 유출량 검토정은 정확도가 70% 이상으로 높게 나타났다. 그림 5는 DrySAT 모형의 유출량, 증발산, 토양수분 검토정 결과를 보여준다.

DrySAT을 이용하여 6개 하천건천화 영향요소별로 1975년부터 2015년까지 10년단위의 연유출량 변화를 평가하였다(그림 6). 그림 6에서와 같이, 다른 요소들은 고려하지 않고 주어

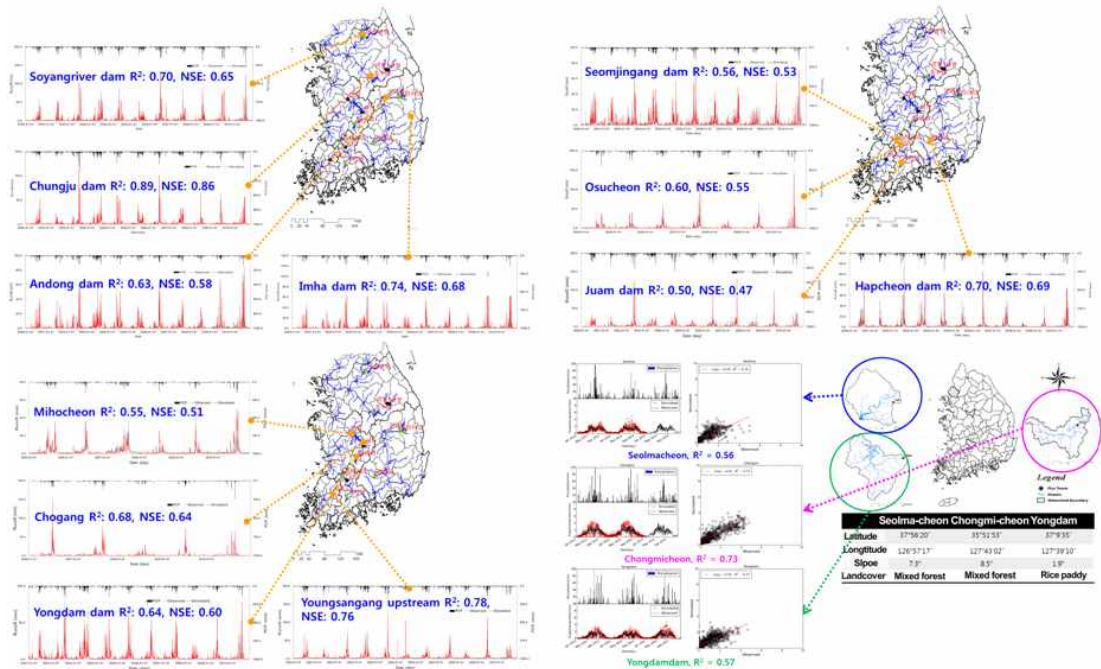


FIGURE 5. Result of calibrating and validating outflow, evapotranspiration, soil water of DrySAT model

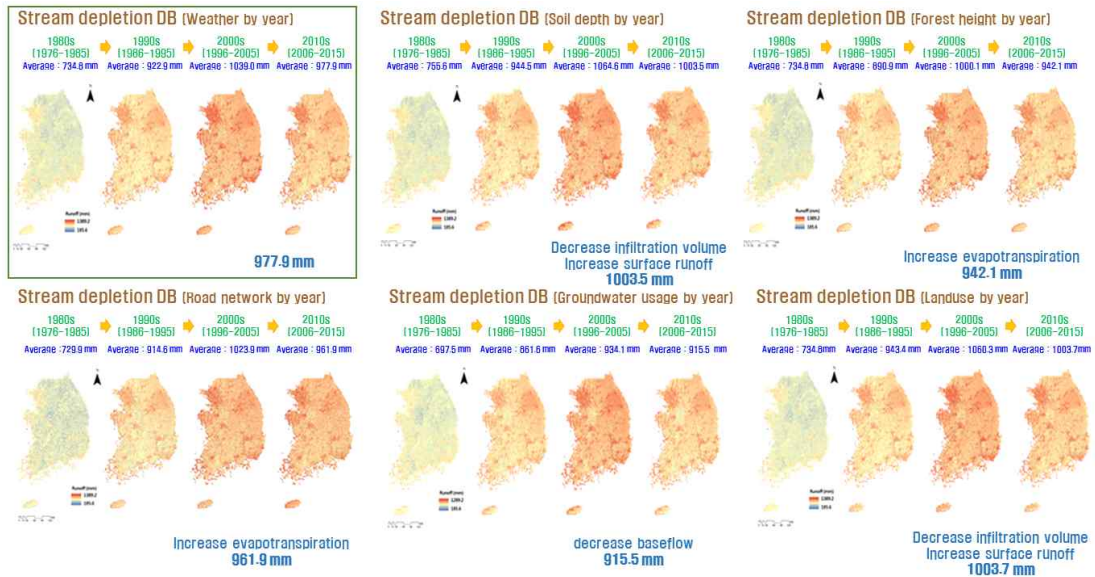


FIGURE 6. Results from assessment the change of annual outflow according to influential factors of stream depletion due to DrySAT

진 기상 조건하에서 연유출량을 산출한 결과 2006~2015년 기간의 연평균 유출량은 기본 값으로 977.9mm이었다.

한편, 1975~2015년 동안 토양침식에 의한 토심 감소를 고려한 연평균 유출량은 1,003.5 mm으로서, 전체적인 토양침식의 감소원인으로, 토양으로의 침투량 감소로 인한 지표유출량이 증가하였기 때문에 기본 값보다 증가하였다.

1975~2015년 동안 산림높이의 증가를 고려한 연평균 유출량은 942.1mm으로서, 산림의 증가로 인해 증발산량이 증가함으로 지표유출량이 감소하였기 때문에 기본 값보다 감소하였다.

1975~2015년 동안 전국 국도의 개발을 고려한 연평균 유출량은 961.9mm으로서, 지속적인 도시화로 인한 도로 건설 증가로 인해 하천으로의 지표유출량이 감소하였기 때문에 기본 값보다 감소하였다.

1975~2015년 동안 지하수 이용량 증가량을 고려한 연평균 유출량은 915.5mm으로서, 무분별한 지하수 개발 및 사용으로 인해 기저유출량 감소로 인해 기본 값보다 감소하였다.

1975~2015년 동안 토지이용 개발 변화를

고려한 연평균 유출량은 1003.7mm으로서, 불투수지역의 증가로 지표유출량이 증가하였기 때문에 기본 값보다 증가하게 변화하였다.

3. 하천 건천화 영향요소별 등급화 결과

앞서 정의된 하천 건천화 정의 및 등급 범위를 기반으로 건천화 등급을 표준유역별로 나타내었다. 본 연구에서 사용된 표준유역은 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 수자원단위지도 Ver 3.0의 총 850개 표준유역을 사용하였다(<http://www.wamis.go.kr>). 수자원단위 지도는 국가 차원의 수자원개발, 계획 및 관리 업무의 효율적 추진을 위하여 수자원 업무에 활용되는 자료의 수집과 분석, 물 관련 기관 간 자료의 공동 활용을 목적으로 지형공간 상에 대권역, 중권역, 표준유역으로 나누어 설정한 지도이다. 수자원단위지도 Ver 3.0은 2011년에 개발되어 대권역(21개), 중권역(117개), 표준유역(850개)로 구성되어 있으며, 표 5와 같이 정리하였다.

그림 7와 같이 다른 요소들은 고려하지 않고

TABLE 5. The hydrologic unit map Ver 3.0 information

Basin name	Basin code	Watershed number	Catchmentnumber
Han river	10	24	237
Anseong stream	11	1	18
Han river (the western sea)	12	2	14
Han river (the eastern sea)	13	3	21
Nakdong river	20	22	195
hyeongsan river	21	1	9
Taehwa river	22	1	6
Hoeya, Suyeong	23	2	9
Nakdong river (the eastern sea)	24	3	25
Nakdong river (the western sea)	25	4	28
Geum river	30	14	78
Sapgyo stream	31	1	16
Guem river (the western sea)	32	3	19
Mangyeong, Dongjin	33	3	24
Seomjin river	40	9	46
Seomjin river (the southern sea)	41	6	27
Yeongsan river	50	8	34
Tamjin river	51	1	4
Yeongsan river (the southern sea)	52	2	10
Yeongsan river (the western sea)	53	3	14
jeju	60	4	16
Total	21	117	850

주어진 기상 조건하에서 등급화 지수를 기준으로 하고 산출한 결과 2006~2015년 기간의 건천화 평균등급은 2.1이었으나, 1975~2015년

동안의 토심 감소로 인한 건천화 평균등급은 2.2, 1975~2015년 동안의 산림 증가에 의한 건천화 평균등급은 2.5, 1975~2015년 동안의

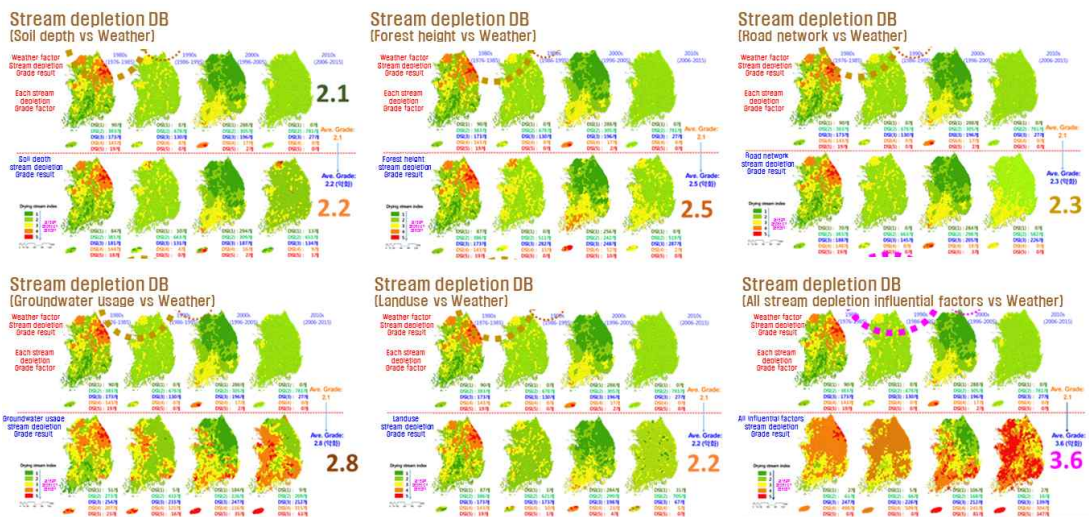


FIGURE 7. Assessment of stream depletion effects according to catchment (classification)

도로 증가로 인한 건천화 평균등급은 2.3, 1975~2015년 동안의 지하수 이용량 증가로 인한 건천화 평균등급은 2.8, 1975~2015년 동안의 토지이용 변화에 의한 건천화 평균등급은 2.2, 1975~2015년 기간 동안 6개 요소 전체에 의한 건천화 평균등급은 3.6으로 각각 악화되는 것으로 평가되었다. 따라서 기본값인 강우 조건을 제외한 5개 하천 건천화 영향요소에 대한 건천화 영향순위는 지하수 이용량 변화에 대한 건천화 영향이 제일 컸으며, 산림 밀도 및 산림 높이 변화, 도로 건설 변화, 토지이용 변화 및 토심 변화 순으로 나타났다.

이에 하천 건천화 영향요소에 대한 6가지 중 시계열 자료로 수집한 4가지 요소(산림높이, 도로망도, 토지이용, 지하수 이용량)에 대해 GIS 자료 구축과 DrySAT 모형 운용을 통한 결과, GIS 자료만으로 확인하였을 때 각 영향요소에 대한 변화가 하천 건천화의 주요 원인이 될 것으로 판단하였으며, DrySAT 모형 운용 결과, 유사하게 하천 건천화의 영향을 주는 것으로 나타났다. 나아가 도로 건설의 경우 불투수면적이 증가하지만 도로의 폭은 상대적으로 좁고 배수 관로가 잘 되어 있기 때문에 지표유출량은 증가하지 않았다. 이에 도시화로 인한 불투수면적 증가와는 다른 결과를 나타내었다.

결 론

수십년에 걸쳐 도시개발 및 다양한 개발 활동으로 인하여 하천 건천화가 전국적으로 빠르게 진행되고 있어 도시지역의 물 순환 구조를 더욱 악화시키고 있다. 대부분의 용수를 지표수에서 활용하고 있는 우리나라는 하천 건천화 현상은 매우 위협적으로 대두되는 실정이다. 아울러 생활·공업·농업용수의 증가로 인한 전체 물 사용량의 지속적 증가는 가뭄 시에 현 국가수자원 시스템으로는 공급 부족의 한계를 드러낼 것으로 우려된다. 따라서 하천 건천화의 진행속도를 늦추기 위하여 다양한 건천화 원인의 파악과 건천화 현황의 정량적 분석이 필수적이다.

이러한 배경에서 그동안 하천 건천화 원인 파

악을 위하여 많은 연구들이 진행되었고, 한국수자원공사에서 대대적인 건천조사도 이루어졌으나 하천 건천화 요인에 대한 정량적인 원인규명은 아직도 힘든 실정이다.

이에 본 연구에서는 세계적으로 시도되지 않은 방식으로서 6개 하천 건천화 영향요소(기상, 토심, 산림높이 및 높이, 도로망, 지하수 이용량, 토지이용)을 대상으로 과거 수십년간의 변화과정을 전국 단위 GIS 자료로 구축하여 연속수문 모형 운용에 대한 기초자료로서 활용하였다. 이러한 영향요소를 대상으로 시계열에 따라 하천 건천화 원인을 분석하고 해석할 수 있는 분포형 연속수문모형 기반의 DrySAT을 활용하여 하천 건천화 평가를 수행하였다. 아울러 이들 각각의 요소들이 어느 지역에 어느 정도의 건천화를 유발하였는지를 평가하는 과학적 프로세스를 개발하였다. 나아가 단일지점의 1차원적인 분석이 아닌 인위적·자연적 요소가 하천 건천화에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서 구축된 하천 건천화 평가결과를 향후 개발될 하천 건천화 평가시스템에서 활용하게 되면 6개 각각의 하천 건천화 영향요소에 대한 행정구역 및 중·표준유역권역별 시계열 공간자료의 변화를 파악할 수 있다. 아울러 유역별 건천화 원인 및 등급, 하천 건천화 취약지역, 건천화의 진행 전망 등도 파악이 가능하다. 나아가 국내에 적합한 맞춤형 건천 관리 및 피해 최소화 방안을 제공하여 향후 중앙정부 및 지자체의 수자원 정책 및 하천 건천화 대응 전략수립에 기여가 클 것으로 사료된다. [KAGIS](#)

REFERENCES

- Barnes, K.B., J.M. Morgan III and M.C. Roberge. 2001. Impervious surfaces and the quality of natural and built environments. Baltimore : Department of Geography and Environmental Planning, Towson University.
- Booth, D. B., D. Hartley and R. Jackson.

2002. Forest cover, impervious-surface area, and the mitigation of stormwater impacts, *Journal of the American Water Resources Association* 38(3), pp. 835-845.
- Jeon, S.M., J.H. Park and C.G. Park. 2012. Application of technique for evaluating streamflow depletion in the urbanized small and medium watershed. *Crisisonomy* 8(6):67-81 (전상미, 박재현, 박창근. 2012. 도시화에 따른 중소규모하천의 건천화 평가기법 적용. *한국위기관리논집* 8(6):67-81).
- Jung, K.S., H.S. Lee, J.Y. Kim and S.M. Pil. 2003. Analysis of drying streamflows characteristics using a GIS. *Korea Water Resources Association* 36(6):1083-1095 (정관수, 조효섭, 김정엽, 심명필. 2003. GIS를 이용한 건천화 하천의 특징분석. *한국수자원학회* 36(6):1083-1095).
- Kim, K.H., J.Y. Park and J.M. Oh. 2005. Analysing the causes of drying streamflow in Kyunan-Cheon. *Korean Society On Water Environment-Korean Society of Water & Wastewater Conference*. pp.637-638 (김경희, 박재영, 오종민. 2005. 경안천 건천화 원인 분석. *한국물환경학회-대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*. 637-638쪽).
- Gyeonggi Research Institute (GRI). 2003. A study on the prevention of drying streamflows in Kyonggi-Do (경기개발연구원. 2003. 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구).
- Lee, W.S. 2008. An essay on streamflows drying. *Korean Water Resources Association* 41(11):56-60 (이우석. 2008. 하천 건천화에 대한 단상. *한국수자원학회* 41(11):56-60).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea (MLTM). 2009. Study on evaluation and improvement of streamflows drying (국토해양부. 2009. 하천건천화 평가 및 개선방안 연구).
- Ministry of Science and Technology of Korea (MST). 2007. Rehabilitation of the hydrologic cycle in the Anyancheon watershed (과학기술부. 2007. 안양천 유역의 물순환 건천화 기술개발).
- Ministry of Science and Technology of Korea (MST). 2003. Technology of sustainable durfacewater development (과학기술부. 2003. 지속가능한 하천수 개발 기술).
- National Assembly Research Service of Korea (NARS). 2010. Countermeasures for water cycle restoration to prevent urban streamflows drying (국회입법조사처. 2010. 도시하천의 건천화 방지를 위한 물순환 건천화 대책).
- Yi, C.S., S.A. Choi, H.S. Kim and S.M. Pil. 2004. Cause analysis on dry of streamflow flow for the Ui-Cheon. *Korea Water Resources Association Conference*. pp.753-758 (이충성, 최승안, 김형수, 심명필. 2004. 우이천의 건천화 원인분석. *한국수자원학회 학술대회*. 753-758쪽).
- Yoo, J.H., K.H. Kim and S.J. Kim. 2014. A study on integrated DB building for GIS based streamflow depletion impact assessment. *Proceedings of Korean Association of Geographic Information Studies*. pp.270-271 (유재현, 김계현, 김성준. 2014. 하천 건천화 영향평가를 위한 GIS 기반 통합 DB 구축방안에 관한 연구. 2014 한국지리정보학회 추계학술대회 논문집. 270-271쪽). **KAGIS**