



수생태 환경유지를 위한 하천생태유량 산정

Assessment of Ecological Streamflow for Maintaining Good Ecological Water Environment

정충길* · 이지완* · 안소라* · 황순진** · 김성준*†

Jung, Chung-Gil · Lee, Ji-Wan · Ahn, So-Ra · Hwang, Soon-Jin · Kim, Seong-Joon

Abstract

The objective of this study is to analyze the relationship between stream water quality of TN (total nitrogen), TP (total phosphorus), and BOD (Biochemical Oxygen Demand) and TDI (Trophic Diatom Index) score determined by physico-chemical factors, biomass, and standing crops of epilithic diatoms, and to estimate the required amount of ecological streamflow for good water environment of Trophic Diatom. For the main stream of Chungju dam watershed of South Korea, total 100 field data of 3 years (2008 ~ 2010) measured in May and September were used to derive the relationship between water quality and TDI. Trophic Diatom had high correlation (0.55 determination coefficient) with TN. Using the relationship, the required streamflow was evaluated by using the Soil Water Assessment Tool (SWAT) for good Trophic Diatom water environment through T-N water quality maintenance. The SWAT simulated 8 years (2003 ~ 2010) stream discharges and T-N water quality along the main stream. From present grade C (score range: 30.0 ~ 45.0) to grade A (score above 60.0) of TDI, the May needs additional streamflow of 63.1 m³/sec (+36.7 % comparing with the present streamflow of 172.0 m³/sec) at the watershed outlet.

Keywords: Correlation analysis; Ecological streamflow; Epilithic diatom; SWAT; TDI (Trophic Diatom Index); Total nitrogen

1. 서론

하천 생태계에서 어류를 포함한 모든 동식물들은 생존과 번식을 위해 일정한 조건의 서식처 환경이 필요하다. 하지만 하천 생태계는 유량변화 또는 수질변화와 같은 환경조건의 변화로 인하여 크게 위협을 받고 있다. 이에 따라 이러한 환경 변화를 고려하여 생태계 서식환경을 평가하고 유지하고자 하는 노력이 최근 많이 진행되어 왔다. 최근 기후변화로 인한 수 자원의 시공간적 분포 특성을 변화는 가뭄과 홍수와 같은 자연재해를 발생 또는 가중시키고 인간의 생활뿐만 아니라 생태계 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있으며 생태계 서식환경의 변화로 인하여 고유종이 멸종되는 결과를 초래하기도 한다 (Kim et al., 2013).

하천 수생태계에서 집중강우와 같은 교란에 영향을 받은 생물의 반응은 수환경의 변화를 유추하는 좋은 자료가 된다. 특히, 하천에 서식하는 부착조류는 수생태계의 1차 생산자로

서 먹이망에 기본이 되며 (Hotzel and Croome, 1999), 짧은 생활사와 생식주기를 가짐으로 인해 인위적 영향에 대해 빠른 반응을 볼 수 있다 (Domingues and Galvao, 2007; Cabecinha et al., 2009). 이러한 특성으로 인해 부착조류, 특히 부착규조류는 생물학적 수질평가에 활용되고 있다 (Watanabe et al., 1986, 1990, 2005; Kelly and Whitton, 1995). 부착규조류를 이용하는 생물학적 수질평가로는 TDI가 대표적이며 생물학적 수질평가 국내 연구로는 갈수기 한강하류의 유기오탁도의 평가 (Jung et al., 2008)와 섬강과 달천의 생물학적 수질평가와 군집에 관한 연구 (Kim and Lee, 2009), 낙동강의 유기오탁도 평가 및 영양단계와 부착규조 간의 관계에 관한 연구 (Lee and Kim, 1996) 시화 반월습지의 갈대부착규조에 관한 연구 (Kim, 2009) 등의 생물학적 수질평가 연구가 수행된 바 있다. 또한 부착조류의 계절적 동태에 관한 연구가 진행된 바 있으며, 특히, Kim et al. (2009)은 남한강지류의 생물학적 수질평가를 위해 TDI 지수와 이화학적 수질의 지표로 사용되는 유기물량, BOD (Biochemical Oxygen Demand), 총질소 (Total Nitrogen, TN), 총인 (Total Phosphorus, TP)과의 상관관계를 분석하여 TN과 BOD와의 높은 상관관계 결과를 보고 하였다.

하천유지유량이란 생활, 공업, 농업, 환경개선, 발전, 주운 등의 하천수 사용을 고려하여 하천의 정상적인 기능 및 상태를 유지하기 위하여 필요한 최소한의 유량을 말한다. 하천유지유량은 엄격하게 보면 환경을 위한 용수라기보다는 하천을

* Konkuk university, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering

** Konkuk university, Department of Environmental Engineering

† Corresponding author

Tel.: +82-2-444-0186 Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

Received: January 7, 2016

Revised: April 8, 2016

Accepted: April 11, 2016

사람이 이용하기 위해 고려된 용수로서 순수한 하천환경 자체를 위한 용수라고 볼 수는 없다. 하천유지유량이나 환경개선용수만으로는 하천의 수생태계 보호에 한계가 있으며 인간을 위한 제도로 규정되면서 최근에는 이와는 차별되는 생물 및 무생물의 보호까지도 배려하는 환경유량의 도입이 필요성이 강조되어왔다. 따라서, 환경생태유량은 수생태계의 건강성을 유지하고 이를 통하여 국민들의 건강하고 쾌적한 환경을 조성하기 위해 필요한 최소한의 유량으로 하천유지유량에서의 수생태계 보호 한계점을 보완한 환경유량으로 정의 내려진다. 환경부에서는 수질 및 수생태계 건강성을 유지하기 위한 수생태계 연속성 및 환경유량을 확보하기 위한 생태유량 산정을 고시하였다. K-water (1995)는 도심지내 하천기능 회복과 생물 다양성에 따른 환경 생태적인 가치에 대해 하천생태계 건전화 개념을 도입하여 담수성 어류 서식처 제공 및 이동에 필요한 유량을 산정한 연구를 수행하였다. Kim et al. (1996a, 1996b)은 물고기 서식처 환경에서 수심과 유속의 수리조건을 만족하기 위한 최소유량 산정 방법을 제시하였다. 이 방법은 하천에서 특정 한계구간, 주로 여울에서 어류 이동에 필요한 수심과 유속을 확보할 수 있는 통과 유량(Bovee, 1982)을 제시한 것이다. Jeong et al. (2007)은 수리서식 모델을 이용한 대상하천에서의 어류서식에 필요한 최적유량을 산정하였다. Choi (2008)는 하천의 유지유량 증가 방안에 따른 수질 및 어류서식환경 개선효과 방안을 제시하였다. 이후, 하천 유지유량과 관련하여 많은 연구(Woo et al., 1998; Sung et al., 2005; Lee et al., 2006; Park et al., 2008; Park et al., 2009)에서 유량변화가 수생태 환경에 미치는 영향을 분석하였다(Choi et al., 2013).

하천이나 호수로 유입되는 수질오염물질의 발생원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원은 주로 가정하수와 공장폐수로 구성되고, 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생하는 강우시나 비강우시 배출량에 큰 변동이 없다는 배출특성을 갖고 있다. 이에 비해 비점오염원은 오염물질이 주로 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로 도시지역의 먼지와 쓰레기, 농지에 살포된 비료 및 농약, 토양침식물, 축사유출물, 자연동식물의 잔여물, 대기오염물질의 강하물 등을 말한다. 비점오염물질은 일반적으로 강우 발생시 유출되기 때문에 일간 및 계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건, 지질, 지형 등에 영향을 많이 받는 특성을 지니고 있다(Choi, 2002). 이러한 오염원의 발생과 배출에 관한 기작(Mechanism)은 매우 복잡하여 오염원 파악 및 정량화는 쉽지 않다. 따라서 효율적인 수질오염원의 관리를 위해서는 지형, 지질, 기후 및 토양 특성, 수문학적 특성, 영농형태 및

토지이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 수용하여 오염물질의 이동 기작등을 예측할 수 있는 수학적 모델을 통한 모델링 기법에 의해 이루어져야 한다. 유역에 따른 수문순환을 고려한 수질오염원의 발생기동을 평가할 수 있고 공간적인 변이에 따른 모델링이 가능한 대표적인 수학적 모델로는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델이 있다. 국내에서 SWAT 모델을 이용한 하천수질 모델링 연구로 Jung et al. (2003)은 HSPF와 SWAT 모델을 이용하여 유출 및 유사 시간 모의와 최적관리기법을 적용하여 효과를 분석하였으며 Jung (2005)은 주암호 유역내 소유역인 외남천 유역을 선정, 모니터링을 실시하여 수문 및 수질관련 인자를 조사하고 분석하여 얻어진 유량 및 수질 관측치를 이용하여 농촌유역에 적합한 SWAT 모델의 적용성을 검토한 바 있다. Park et al. (2008)은 SWAT을 이용하여 미래 토지이용변화에 따른 유출량, 수질모의를 하여 기후변화 시나리오에 따른 수문 기작을 모의 하였다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 연구조사로 산정된 전국 TDI 등급과 수질오염(TN, TP, BOD)과의 상관성을 분석하고 수질오염성분중 상관성이 가장 크게 나타나는 성분에서 TDI의 범위를 산정하고 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모델의 TN 모델링 결과로부터 TDI 등급을 개선하기 위한 생태유량 부족량을 분석하여 유역 수생태 등급을 평가하고자 한다. 기존의 유량분석 연구에서는 연단위 유황분석을 실시한 후 최저유량에 대해 필요유량을 산정하였으나 본 연구에서는 생태등급 실측자료로부터 해당하는 4월, 9월의 일단위 유량의 공급유량을 산정하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. SWAT 모델

본 연구에서는 수문수질모의를 위한 모델로 SWAT 모델을 선정하였다. SWAT 모델은 장기-강우 유출 모델로 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량 및 미계측유역의 비점오염을 추정하기 위해 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에 의해 개발된 유역모델이다. SWAT 모델은 수문순환에서 토지부분은 각 소유역의 주 하천에 물과 유사, 영양물질 및 살충제의 부하량을 조절한다. 침식과 유사량은 수정 범용토양침식공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)에 의해 추정되는데, USLE가 침식에너지의 지표로서 강우를 사용하는 반면에 MUSLE는 침식과 유사량을 모의

하기 위해 총 유출량을 사용한다. 영양물질은 주 하천에 유입 되고 지표 유출 및 측방 지하 유출에 의하여 하류로 운송되어 유역에서 질소와 인의 여러 형태로 나타나는 전이와 이동을 추적한다. 또한, SWAT 모델은 전체유역을 더 작은 유역(소유역)으로 분할이 가능하며 균질한(Homogeneous) 최소 물질 이송 영역을 수문반응단위(Hydrology Response Unit, HRU)로 구분한다(Neitsch et al., 2001).

2. 대상유역 및 입력자료

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 행정구역상 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9%, 28.4%, 1.7%를 차지하고 있는 충주댐 유역은 지난 수십 년 동안 벌채, 개간 등에 의한 산림의 변화, 도시개발, 단지 및 주거지 조성, 농경지정리, 밭 개간 등에 의한 토지이용의 변화, 논 내 비닐하우스 재배 등에 의한 물이용 형태의 변화 등 꾸준한 변화가 지속되어왔다. 충주댐유역의 유역면적은 8,245.6 km²이며, 유역평균표고는 542.8 m (71.0 ~ 1537.0 m), 유역평균경사는 36.9%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적은 5,573.1 km²로서 유역면적의 84.6%에

이른다.

SWAT 모델의 기상입력 자료는 강수량, 온도, 풍속, 태양 복사량 그리고 상대습도 자료를 이용하며 충주댐 유역의 관측소는 대관령, 원주, 영월, 충주, 청주, 태백 총 6개의 기상관측소의 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 기상입력 자료는 1998년부터 2010년까지의 총 13년간의 일 자료이며 기상청으로부터 제공받았다.

모델 보정 및 검증에 위해 최종유역출구지점에서의 유출 및 수질오염물질의 일별 자료를 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 실측 자료를 바탕으로 검토정을 수행하며, 유역 전체를 대표하여 매개변수를 선정하였다.

SWAT 모델에서 필요한 지형입력 자료는 NGIS(National Geographic Information System)의 1:5,000 수치지도로부터 격자크기 100 m로 제작한 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도, 정밀토양도를 각각 100 m 해상도로 제작하여 사용하였다(Fig. 2). 토지이용도는 2008년 환경부에서 배포한 토지피복도를 이용하여 총 9개의 토지이용항목을 수역, 도심지, 나지, 초지, 논, 밭 그리고 활엽수림, 혼효림, 침엽수림으로

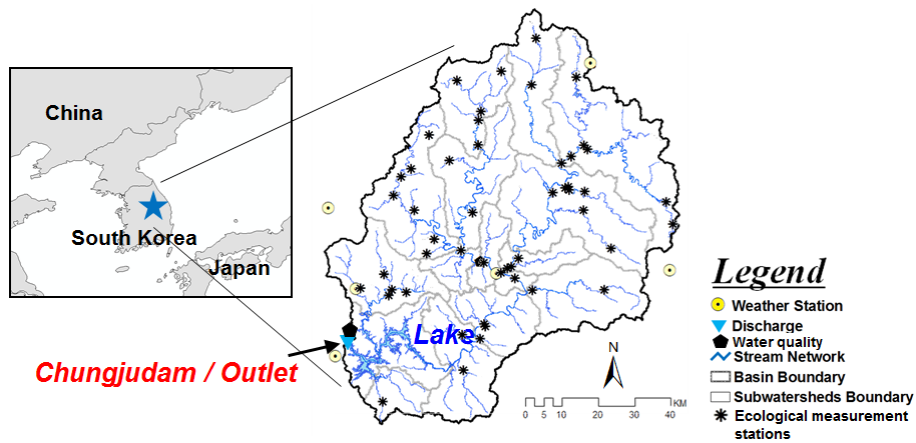


Fig. 1 Location of the study watershed, and weather, streamflow and water quality gauging stations

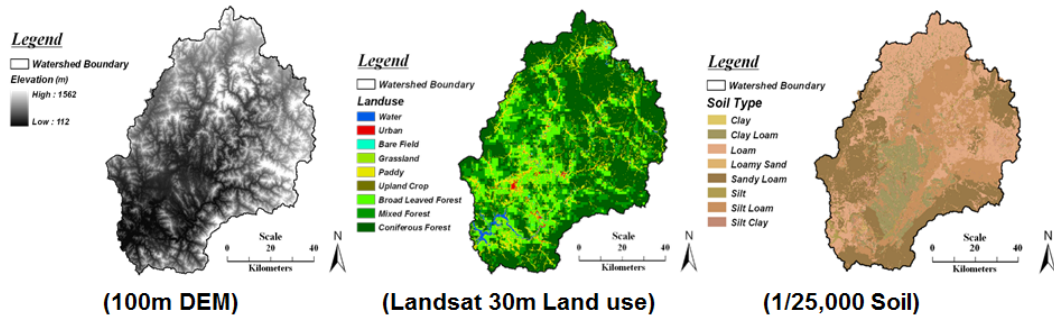


Fig. 2 The GIS data of watershed

분류하였다(Fig. 2). 농촌진흥청에서 제공하는 1 : 25,000 정밀토양도(Fig. 2)를 이용하였으며, 토양층의유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 Saxton et al. (1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다.

3. 수생태계 등급자료

생태계(ecosystem)는 수량, 수질, 물리적 서식지 등 무생물학적 환경요소와 생물학적 요소로 구성되어 있으며, 시스템 내에서 이들 요소들의 상호작용의 결과는 생태계의 독특한 구조와 기능으로 나타난다. 수생태계 건강성을 확보하기 위해서는 양호한 화학적 수질과 안정적인 물리적 서식지 확보가 선행되어야 한다. 건강한 수체는 생태학적으로 온전하거나 교란되지 않은 상태를 나타내며, 화학적, 물리적 및 생물학적 총체성을 모두 포함하는 생태학적 총체성으로 표현된다(US. EPA, 2002). 건강한 수체에 대한 생물학적 평가는 교란된 수체의 현재 상태를 파악하고 건강성의 회복을 위한 판단의 근거를 제공하며, 생물학적 평가를 근거로 해당 수체의 회복과 복원을 위한 목표를 설정할 수 있다.

수생태계 건강성 평가는 기본적으로 생물학적인 지표와 평가방법을 요구하며, 궁극적으로는 국가적 혹은 지역적 차원에서의 지속적인 생물모니터링의 과정을 통해 실현된다. 따라서 그 지역 혹은 국가의 물 환경에 부합하는 표준화된 조사분석방법이 필요하다. 서식하는 생물의 구조와 기능에 근거한 생물학적 평가는 이화학적 평가에 비하여 물 환경에 대해 종합적이고 장기적인 영향을 파악할 수 있게 하며 교란된 환경이 궁극적으로 회복하여야 할 생물학적 상태에 대한 정보를 제공해 준다.

국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, 2013)에서는 2008 ~ 2010년 동안 봄(5월), 가을(9월)에 전국 800개 지점에서의 부착돌말지수(TDI) 산정을 위한 하천환경 및 영양물질, 생물종의 종류 등을 직접 관측하여 등급을 산정하였다. TDI 지수(Score)는 D(0 ≤ ~ <30), C(30 ≤ ~ <45), B(45 ≤ ~ <60), A(60 ≤ ~ <100)로 수생태계 등급을 나타냈다. 본 연구에서는 이 결과를 활용하여 수질오염인자(TN, TP, BOD)와의 상관성을 분석하였다.

가. 부착돌말지수(TDI, Trophic Diatom Index)

부착돌말류는 하천생태계의 먹이사슬의 근간을 구성하는 1차 생산자로서 생태계 내 에너지 전달의 기초를 담당하고 있으며 돌, 식물, 모래, 진흙 등 다양한 기질에 부착하여 살아간다. 생물학적 평가에 주로 이용되는 부착돌말류는 돌말류(diatom)이며, 하상의 자갈이나 호박돌 등의 돌에 부착된 돌

부착 돌말류(epilithic diatom)가 주를 이룬다. 돌말류는 넓은 범위의 오염구배에 적응하므로 모든 하천에서 발견되며, 어떤 종들은 환경적 변화와 그들 서식처의 조건에 대해 다양하고 민감하게 반응하여 생태학적으로도 유용한 지표생물(biological indicator)로 이용된다. 또한 하천생태계에서 부착돌말류 중 조성의 변화는 수생태계 건강성에 영향을 미치는 환경 스트레스를 진단하는 데에 이용할 수 있으며 생물보전에 대한 평가에 이용가능하다. 본 연구에서는 수생태계 건강성 조사 및 평가(National Institute of Environmental Research, 2013)보고서에 따라 2008 ~ 2010년 전국 부착돌말지수(TDI, Trophic Diatom Index) 등급 자료를 이용하였다. TDI 등급 평가지점은 다음 Fig. 1과 같다.

4. 연구접근방법

본 연구의 연구접근방법은 Fig. 3과 같다. 수생태계 등급을 개선하기 위한 필요 생태유량을 산정하기 위해 유출량 및 수질자료의 상관성분석을 선행으로 실시하고 상관성이 가장 높게 나타나는 수질성분에 대해 TDI 등급의 범위를 추정한다. 여기서, 실측 TDI와 실측 수질자료들은 2008 ~ 2010년에 국한된 자료로 과거 및 현재까지의 수생태계 등급의 변화를 분석하기에는 제한적이다. 따라서, 실측유출 및 수질자료의 시간 및 공간적 제한으로 SWAT 모델을 이용하여 과거 2003년부터 수생태계 등급 관측조사 시기인 2010년까지의 유출량과 수질의 모의 및 검보정을 실시하여 적용성을 평가하고 모의결과의 시공간적 생태부족유량을 산정한다. 유황분석을 통한 최저유량을 산정한 후 필요유량을 산정하는 기존 연구와 달리 일단위 유출 및 수질 모의결과를 이용하여 TDI 등급 범위 산정결과와 비교하여 등급을 개선하기 위한 일단위 필요유량과 필요시기를 추정한다.

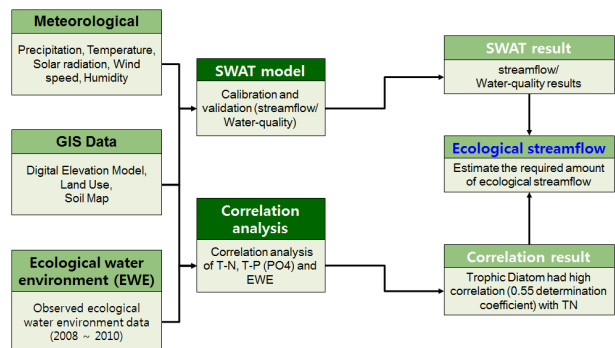


Fig. 3 The location of ecological measurement stations

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모델의 적용성 평가

본 연구에서는 수문-수질 보정을 위해 LH-OAT 방법을 이용하여 충주댐 유역 전체에 대한 유출 및 유사와 관련된 대표 매개변수를 선정하고 보정에 사용하였다. Fig. 4는 LH-OAT 민감도 분석 결과에 따른 매개변수 등급을 정리한 것으로 유출관련 매개변수는 평균 민감도가 0에 가까운 매개변수를 제외한 총 10개의 매개변수와 수질관련 매개변수에 대한 민감

도 등급을 나타낸다. 먼저 유출관련 매개변수 등급을 살펴보면, Ch_N과 CN2가 크게 민감한 것으로 분석되었으며 ESCO, Sol_Awc Surlag 등의 매개변수가 비교적 민감한 것으로 분석되었다. Table 1은 민감도 분석에 따른 최적의 매개변수를 선정하였다.

모의 유출량은 총 4개년도(2003~2006)동안 보정을 실시하였으며 4개년(2007~2010)간의 자료를 대상으로 검증을 실시하였다. 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수(R^2 , determination coefficient)와 모델의 효율성 검증

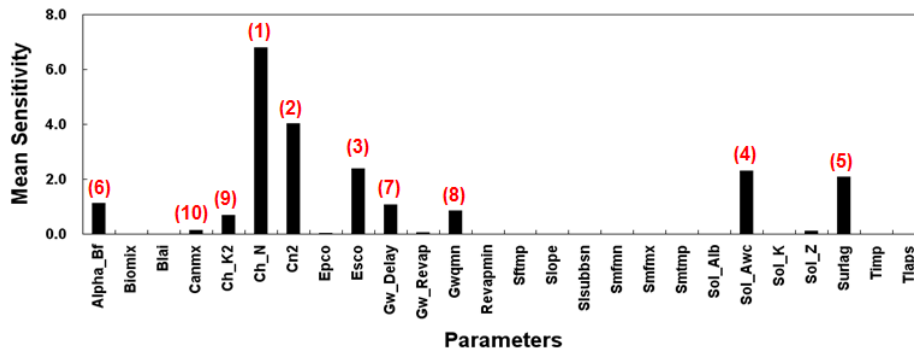


Fig. 4 Mean sensitivity calculated for hydrology parameters by LH-OAT method

Table 1 SWAT calibrated parameters

Parameter	Definition	LB	UB	Sensitivity	Adjusted Value
Q	ESCO	0	1	High	0
	ALPHA_BF	0	1	High	0,05
	RCHRG_DP	0	1	Medium	0,6
	GW_DELAY	0	500	High	31
	GW_REVAP	0,02	0,2	Medium	0,02
	GWQMN	-1000	1000	Medium	300
	CH_N	0	1	High	0,01
	CH_K2	0	150	High	35
SN	SMFMX	1,4	6,9	Medium	4,5
	SMFMN	1,4	6,9	Medium	4,5
	SMTMP	-5	5	High	1,5
AN	RAMMO_SUB	0	-	High	6
	RCN_SUB	0	-	High	9
	DRYDEP_NH4	0	-	High	8,5
	DRYDEP_NO3	0	-	High	8
	FIXCO	0	-	Medium	1
	NFIXMX	0	-	Medium	3,3
	FRT_KG	0	-	High	257,4

Q: Streamflow, SN: Snow parameter, AN: Anthropogenic nitrogen, LB: Lower bound, UB: Upper bound

Table 2 Statistical summary of observed versus SWAT simulated streamflow for calibration (C) and validation (V) periods

Year	PCP (mm)	Discharge (mm)		Runoff ratio (%)		NSE	R ²	Note
		Obs.	SWAT	Obs.	SWAT			
2003	1,598.3	1,051.1	811.4	65.8	50.8	0.77	0.79	C
2004	1,542.0	911.5	714.9	59.1	46.4	0.74	0.74	C
2005	1,494.4	743.1	626.2	49.7	41.9	0.74	0.76	C
2006	1,348.0	954.6	826.6	70.8	61.3	0.75	0.75	C
2007	1,475.6	1,016.5	1,009.1	68.9	68.4	0.71	0.75	V
2008	950.7	403.4	318.4	42.4	33.5	0.74	0.84	V
2009	1,168.0	613.2	570.6	52.5	48.9	0.72	0.67	V
2010	1,258.5	809.1	728.5	64.3	57.9	0.74	0.75	V
Mean	1,354.4	812.8	700.7	59.2	51.1	0.74	0.76	-

PCP: Precipitation, Obs.: Observed, R²: determination of coefficient, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency

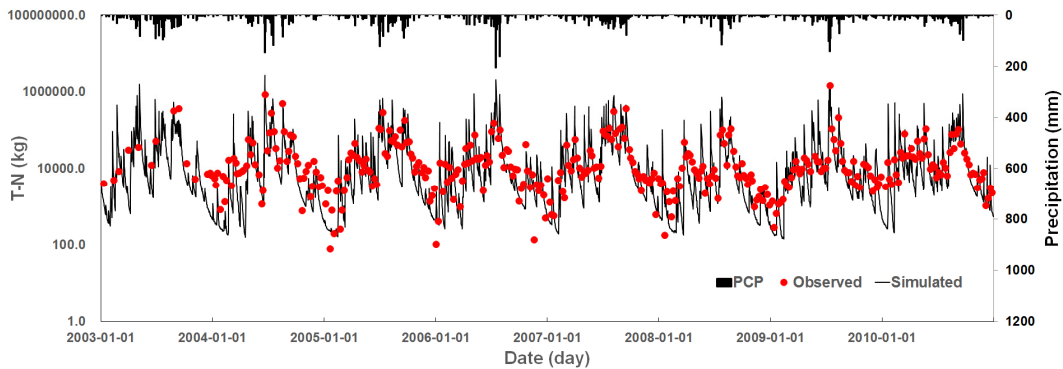


Fig. 5 Comparison of observed versus SWAT simulated T-N

은 여러 연구에서 사용된 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) 계수를 사용하였다. 유출 보정 및 검증 결과의 R²는 0.67~0.84, NSE는 0.71~0.77로 모의치와 실측치의 유출량은 유의성이 있는 것으로 분석되었다 (Table 2).

유출량 보정 후, TN에 대해 보정을 위해 질소 대기침전량, 점오염원, 비료 및 분뇨 및 생물학적 질소 고정량의 입력자료를 구축하여 Table 1에 anthropogenic nitrogen 매개변수를 적용하여 검보정을 실시하였다. 입력된 TN 입력자료들은 각각 국립환경과학원에서 관측하고 있는 산성강하물 측정소 (서울 불광동 등 39개 지점)에서 측정된 대기질소와 농림수산식품부 농림통계연보 (1999~2010년)의 전국 비료 및 분뇨 질소사용량과 국립환경과학원 국가 질소수지와 관리방안에 관한 연구 (2012)에서 제시하는 생물학적 질소 고정 자료를 구축하였고 국립환경과학원에서 제공하는 2008년~2010년 일별로 측정된 점오염원 자료를 이용하였다. 충주댐 유역 내 점오염원 일평균 질소 배출량은 각각 2.71 kg (Organic nitrogen), 116.5 kg (Nitrate), 6.8 kg (Ammonia)이며 연강우량에 따른

대기의 질소 침전량은 각각 4.5 mg/l (Nitrate), 3 kg (Ammonia), 비료 및 분뇨 평균 공급량은 257.3 kg/ha로 나타났으며 생물학적 질소고정량은 논과 밭에서 각각 35 kg/ha/yr와 15 kg/ha/yr로 적용하였다. Fig. 5는 실측치와 모의치 TN을 비교한 그래프이며 검보정 결과 R²는 0.50~0.82 높게 나타났으며 이는 모의치와 실측치가 유의성이 있는 것으로 나타났다.

2. TDI 분석

전국 TDI 자료의 분석을 위해 한강 유역의 해당되는 50개 지점으로부터 실측 TDI 등급점수와 실측 TN, TP 및 BOD와의 상관관계를 분석하였다 (Fig. 6). 분석결과 5월 및 9월에 측정 TDI는 TP, BOD에 비해 TN과 큰 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. TDI와 TN의 R²는 각각 5월에 0.54, 9월에 0.44로 나타나 유의성이 있는 것으로 판단되었다. TN에 따른 TDI 등급범위 지정을 위해 관측자료의 t분포를 실시하여 등급별 95% 신뢰구간을 산정하였다. 따라서, Table 3과 같이 TN 범위에 따라 등급 범위를 지정하여 유역차원에서의 TDI 등급범위

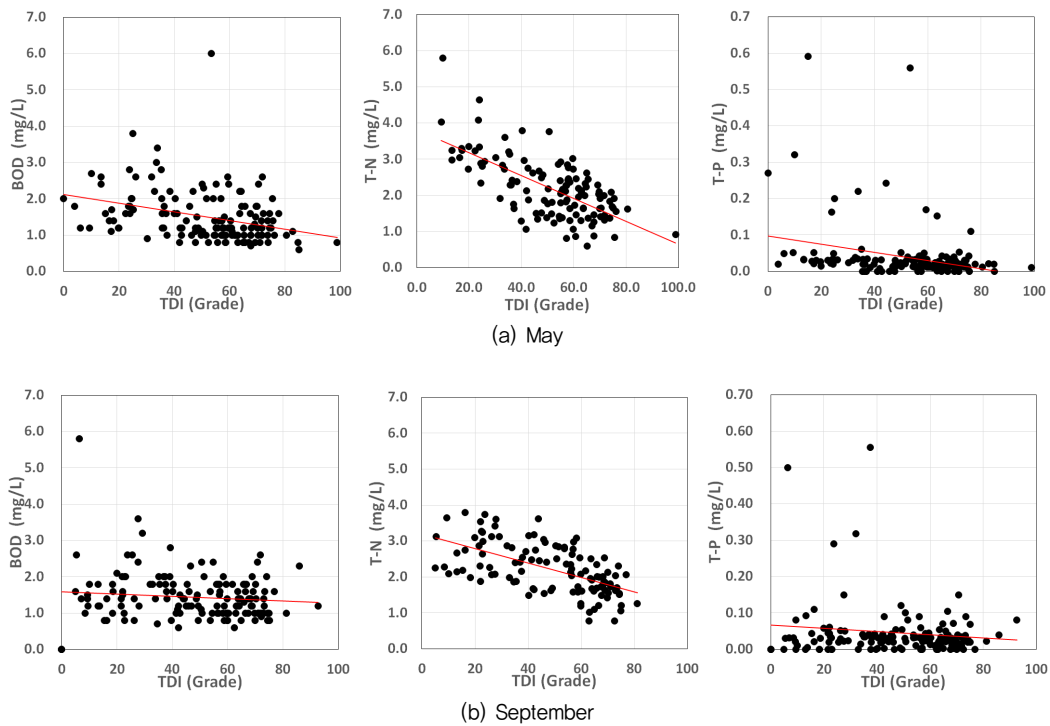


Fig. 6 The correlation of TDI (Trophic Diatom Index) and water quality (TN, TP, and BOD)

Table 3 The range of TDI grade by TN concentration (mg/L)

Grade	Range (mg/L)		Mean (mg/L)	
	May	September	May	September
A	1,542 ≤ TN ≤ 1,857	1,588 ≤ TN ≤ 1,865	1,700	1,719
B	1,846 ≤ TN ≤ 2,243	2,050 ≤ TN ≤ 2,511	2,045	2,280
C	2,136 ≤ TN ≤ 2,789	2,146 ≤ TN ≤ 2,703	2,453	2,425
D	2,983 ≤ TN	2,554 ≤ TN	3,408	2,791

를 산정하였다.

TN이 TDI와 가장 높은 상관성을 나타내는 이유로 Kim et al. (2009) 및 Hwang et al. (2006)의 사전 연구사례를 들어 설명할 수 있다. 이들 연구들 또한 영양염 물질에 따른 TDI의 민감도 조사를 분석하였다. 그 결과 부착규조류의 출현과 발달은 영양염류에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 규조류가 다른 생물군에 비해 수질의 변화에 따른 민감도가 상대적으로 높기 때문에 나타난 결과로 판단되며 특히 TDI 지수는 영양염인 NO₃와 가장 높은 상관성을 보였다. 이러한 결과의 이유로는 첫 번째로 오염수역에서 저서성 규조류들이 부착하여 서식하고 있는 기질로 인한 정체수역의 성장환경 조건을 들 수 있다. 두 번째로 조류의 성장과 번식을 위해 필요한 영양성분인 탄소, 질소, 인중에서 성장제한 영양염은 질소와 인으로 조체를 형성하는데 특히 질소는 단백질 구성 물질

로 기여함에 따라 규조류의 출현과 발달이 질소에 의해 더 큰 영향을 받기 때문이다.

3. TDI 평가 및 생태유량 부족량 산정

실측자료로부터 산정된 TDI 등급범위와 SWAT 모델의 검보정 실시후 TN 모의결과를 활용하여 시험유역 내 시공간별 TDI 등급을 산정하고 A등급으로 개선을 위한 필요유량을 분석하였다. 검보정된 TN 모의치로 TDI 등급을 산정하는 이유는 2002년~2010년 충주댐 유역에 실측 TN자료가 부족하고 공간적으로 수생태계 등급자료는 유역 내 다양한 지점에서 측정되었지만 실측치는 한정된 지점에서만 측정을 하고 있어서 실측 TDI와 비교하기가 어렵기 때문에 검보정된 모의 T-N값을 사용하여 생태유량을 산정하였다.

충주댐유역의 TDI를 평가하기 위해 SWAT의 TN 모의결

Table 4 The range of TDI by T-N concentration (mg/L)

Date	T-N (ton)	streamflow (m ³ /sec)	T-N (mg/L)	TDI		REF (m ³ /sec)	
				Sim.	Obs.		
May	2002	1,882.6	266.0	2,642	C	-	112.5
	2003	3,067.8	499.5	2,293	C	-	117.3
	2004	829.2	101.4	3,052	D	-	65.3
	2005	287.5	39.8	2,700	C	-	18.0
	2006	1,161.2	179.2	2,419	C	-	54.3
	2007	1,009.9	139.2	2,708	C	-	63.8
	2008	293.9	48.7	2,255	B	B	10.4
	2009	982.3	123.1	3,179	C	B	74.4
	2010	1,009.5	150.7	2,501	B	B	52.3
Mean	1,169.3	172.0	2,639	C	-	63.1	
September	2002	799.9	191.0	1,615	A	-	-
	2003	2,320.6	491.9	1,820	A	-	-
	2004	1,066.6	227.5	1,809	A	-	-
	2005	2,366.9	457.5	1,996	B	-	20.0
	2006	109.0	103.3	0.407	A	-	-
	2007	3,024.1	668.2	1,746	A	-	-
	2008	215.9	60.7	1,372	A	A	-
	2009	149.5	82.2	0.701	A	B	-
	2010	4,224.2	833.4	1,956	B	B	26.2
Mean	1,586.3	351.2	1,480	A	-	-	

REF: Required ecological streamflow (Ecological water shortage)

과를 활용하여 2003년~2010년 TN에 따른 TDI 등급과 A 등급 개선을 위한 필요생태유량 (REF, Required ecological streamflow)을 산정하였다 (Table 4). TN에 따른 TDI 등급 산정결과로 5월에는 C~D등급으로 수생태계 환경이 악화되는 것을 알 수 있는 반면에 9월에는 평균 A등급을 나타내 생태유량의 부족량 없이 A등급을 유지하는 것으로 나타났다. 이 결과는 8년 동안 평균적으로 5월에 충주댐유역에서는 월평균 63.1 m³/sec의 생태유량이 부족하여 부처들말류에 의한 수생태계를 최적으로 관리할 수 없음을 나타낸다. 유역전체 월평균 63.1 m³/sec의 생태유량 부족량에 대하여 주하천의 상류유역에서의 생태유량 부족량을 판단하기 위해 상류 3번, 13번 유역을 focus watershed로 선정하여 현재 TDI 등급 및 생태유량 부족량을 산정하였다 (Fig. 7). 최상류 3번 유역에서는 현재 TDI B등급을 나타내고 있으며 A 등급으로 개선을 위해 월평균 11.1 m³/sec의 생태유량의 부족량을 나타내고 있으며 13번 유역에서는 현재 TDI C 등급으로 A 등급으로 개선을 위해 월평균 49.0 m³/sec의 생태유량의 부족량을 나타냈다. 이는, 유역 전체에서 요구되는 63.1 m³/sec의 생태유량 부족량을 최상류 지점과 중류지점에서의 유량 및 수질을 개선함

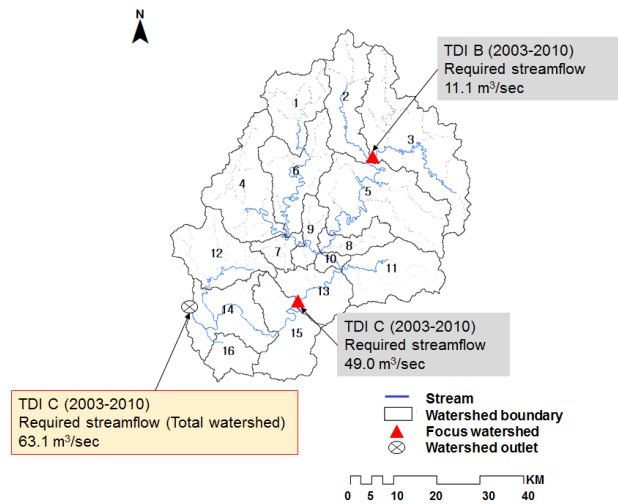


Fig. 7 The required streamflow on focus watershed according to upstream

로서 유역전체의 생태등급을 개선할 수 있는 것으로 판단된다. 월평균 생태유량 부족량을 생태등급을 개선하기 위해 한 달 동안 필요한 총 유량 값을 의미한다. 이는 분석하는 월의 유

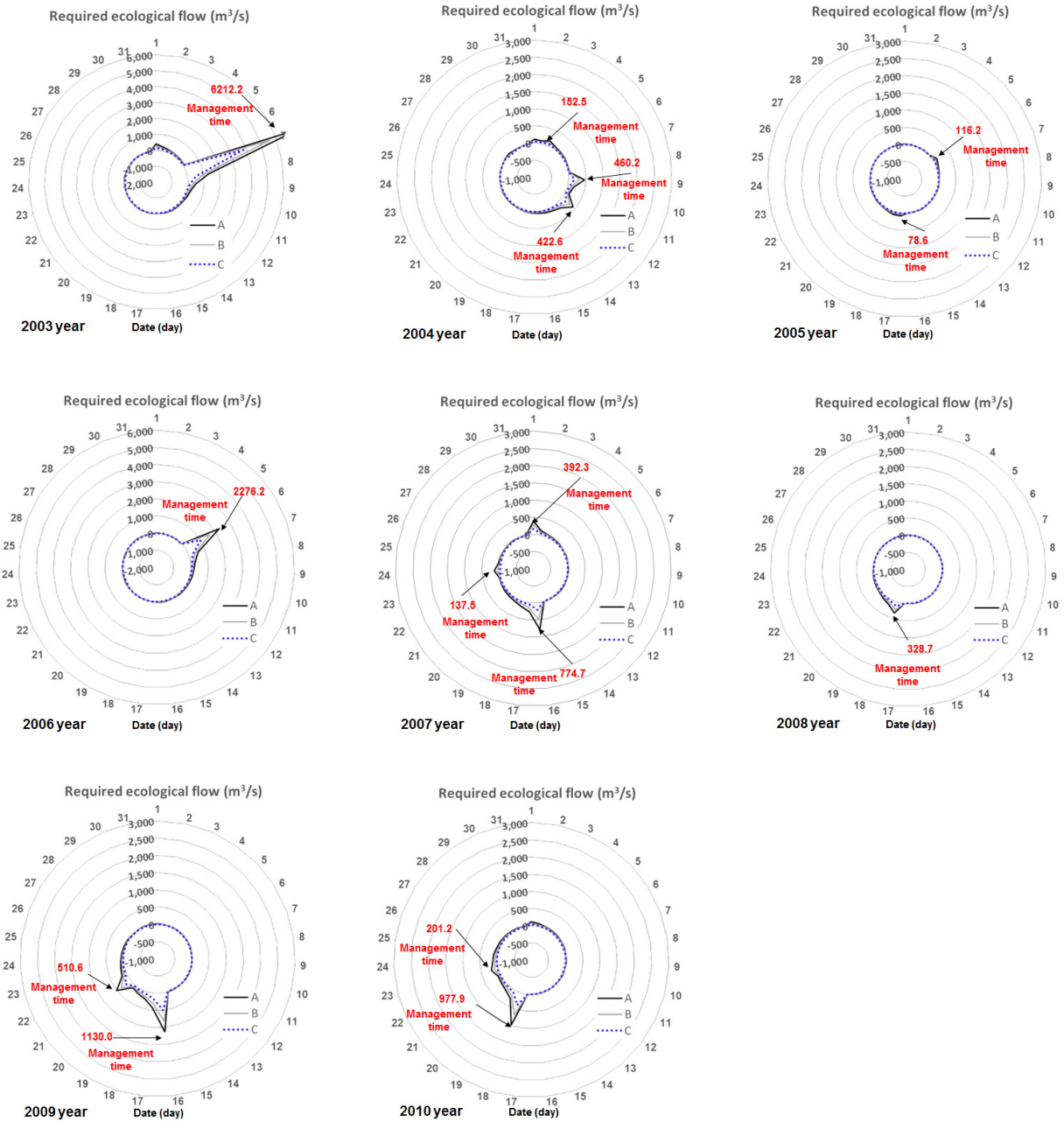


Fig. 8 The water supply and management time of required ecological flow

황분석을 실시하여 월 평수량을 산정하는 기준에 하천유지유량의 평균유량 결정방법과는 다르게 단순 월평균 총 유량을 의미한다. 이를 보완하기 위해, 일 유량 분석을 실시하여 일별 최적생태유량 부족량 및 추가적으로 생태유량 관리가 필요한 시기를 판단하였다 (Fig. 8).

Fig. 8은 5월 1일부터 5월 31일까지 연도별 일 생태유량 부족량이 0보다 작거나 0에 가까울수록 현재 등급이 A를 나타

내며 0보다 커질수록 현재등급에서 A등급으로 개선하기 위한 생태유량 부족량이 커지는 것을 의미한다. 생태유량 부족량이 가장 크게 나타나는 2003년 결과를 살펴보면 5월 6일~5월 8일까지 최대 6,212.2 m³/sec의 생태유량이 부족하며 나머지 기간에는 A등급을 유지하는 것으로 나타났다. 생태유량 부족량이 가장 작게 나타나는 2005년에는 5월 6일, 5월 17일에 각각 116.2, 78.6 m³/sec의 생태유량 부족량을 나타냈다. 이러

한 결과는 연구기간에 해당하는 4월 및 5월에 항상 생태유량이 부족한 것이 아니므로 등급이 가장 악화되는 시기를 판단하여 관리시기 (management time)로 정하여 생태유량을 공급하거나 공급이 어려운 경우 TN의 배출량을 줄임으로써 유역의 수생태계 개선을 도모 할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 기존의 연구조사로 산정된 전국 TDI 등급과 수질오염 (TN, TP, BOD)과의 상관성 분석 및 수질오염성분 중 상관성이 가장 크게 나타나는 성분에 따른 TDI의 범위를 산정하고 SWAT 모델을 이용하여 충주댐 유역을 대상으로 TDI 등급을 개선하기 위한 생태유량 부족량을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수생태계 등급을 판단하기 위한 인자로 부차돌말지수 (TDI)를 구축하였다. 국립환경과학원에서는 2008~2010년 동안 봄 (5월), 가을 (9월)에 전국 800개 지점에서의 부차돌말지수 산정을 위한 하천환경 및 영양물질, 생물종의 종류 등을 직접 관측하여 등급을 산정하였다. 본 연구에서는 이 결과를 활용하여 수질오염 (TN, TP, BOD)과의 상관성을 분석하여 TDI는 TP, BOD에 비해 TN과 큰 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. TDI와 TN의 R^2 는 각각 5월에 0.54, 9월에 0.44로 나타나 유의성이 있는 것으로 판단되었다. TN에 따른 TDI 등급범위 지정을 위해 관측 자료의 t분포를 실시하여 등급별 95% 신뢰구간을 산정하여 TDI 범위를 산정하였다.
2. 충주댐 유역의 일단위 유출량 및 TN을 산정하기 위해 SWAT의 입력유형별 매개변수를 정리하여, 총 유출량 및 침투유량과 감수곡선 형태에 영향을 미치는 유출 매개변수를 선정하여 유역별 불확실성을 분석하고 민감도 분석에 따른 최적의 매개변수를 선정하였다. 모의 유출량은 총 4개년도 (2003~2006)동안 보정을 실시하였으며 4개년 (2007~2010)간의 자료를 대상으로 검증을 실시하였다. 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 R^2 , NSE를 사용하였다. 유출 보정 및 검증 결과의 R^2 는 0.67~0.84, NSE는 0.71~0.77로 모의치와 실측치의 유출량은 유의성이 있는 것으로 분석되었다. 유출량 보정 후, T-N에 대해 보정을 위해 질소 대기침전량, 점오염원, 비료 및 분뇨 및 생물학적 질소 고정량의 입력 자료를 구축하여 SWAT anthropogenic nitrogen 매개변수를 적용하여 검보정을 실시하였고, 그 결과 R^2 는 0.50~0.82 높게 나타났으며 이는 모의치와 실측치가 유의성이 있는 것으로 나타났다.

3. 충주댐유역의 TDI를 평가하기 위해 SWAT의 TN 모의결과를 활용하여 2003년~2010년 TN에 따른 TDI 등급과 A 등급 개선을 위한 생태유량부족량 (REF, Required ecological streamflow)을 산정하였다. TN에 따른 TDI 등급 산정결과로 5월에는 B~C등급으로 수생태계 환경이 악화되는 것을 알 수 있는 반면에 9월에는 평균 A등급을 나타내 생태유량의 부족량 없이 A등급을 유지하는 것으로 나타났다. 이 결과는 8년 동안 평균적으로 5월에 유역전체 월평균 63.1 m^3/sec 의 생태유량이 부족하여 부차돌말류에 의한 수생태계를 최적으로 관리할 수 없음을 나타낸다. 그러나, 월평균 값은 적정 생태유량 부족량 및 생태유량 조절시기를 알 수 없다. 따라서, 연도 및 일별로 TDI를 산정하여 일별 최적 생태유량 부족량을 산정하여 추가적으로 생태유량 관리가 필요한 시기를 판단하였다. 생태유량 부족량이 가장 크게 나타나는 2003년 결과를 살펴보면 5월 6일~5월 8일까지 최대 6,212.2 m^3/sec 의 생태유량이 부족하며 나머지 기간에는 A등급을 유지하는 것으로 나타났다. 생태유량 부족량이 가장 작게 나타나는 2005년에는 5월 6일, 5월 17일에 각각 116.2, 78.6 m^3/sec 의 생태유량 부족량을 나타냈다.

본 연구는 다양한 인자를 고려한 수생태계 등급 실측자료로부터 유역 모델링을 연계하여 과거 및 현재 유역단위의 수생태계 등급을 분석하여 개선 방안을 제시하였다. 이는, 미래 기후변화로 인한 수생태계 악화를 해결하기 위한 기초자료로 활용될 수 있으며 생태유량 산정 표준 방법으로 미래 수생태계의 개선을 위한 생태유량을 제도적으로 정립할 수 있다. 또한, 현재 생태유량 부족량 산정은 유역에서의 생태유량 공급 및 관리에 필요한 시기를 결정하는 것으로 최종적으로 미래 기후변화에 따른 관리대책을 위한 유역관리방안 정립에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

매년 다르게 나타나는 생태유량부족량과 관리 시기는 미래 기후조건에 따른 예측이 필요하며 실제 적용 시 수원 공급원이 포함하는 하류유역에서는 부족한 생태유량을 공급하고 공급원이 없는 상류유역에서는 TN을 저감함으로써 TDI 등급을 개선하는 방안을 제시할 수 있다. 본 연구의 결과로 생태등급의 개선을 위해서 필요한 생태유량을 산정하였지만 충주댐유역은 상류유역으로 추가 유량공급이 불가능하며 따라서, TN의 오염부하량을 줄임으로써 생태등급을 개선할 수 있고 이를 위해 비점오염원 평가 및 저감 방안 적용이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 총 3년 동안의 수생태계 등급 실측자료를 활용하였으며 이는, 장기간의 수생태계 변화를 검증하기에는 한계가 있다. 따라서, 추가적인 실측 수생태계 등급 자료와 전국

으로 유역을 확장하여 시공간적으로 다양한 자료로부터의 표준화된 연구 결과가 요구된다. 추 후 연구로 미래 기후변화를 적용한 강우 및 기상조건 변화에 따른 장기적인 생태유량 부족량의 변화를 분석 및 예측하여 수자원중장기종합계획에 필요한 인자를 제시할 수 있는 연구가 병행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (11 기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bovee, K.D., 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Instream Flow Information 12, U.S Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-82/26, Fort Collins, Colorado.
- Cabecinha, E., R. Cortes, J. Cabral, T. Ferreira, M. Lourenço, and M. Pardal. 2009. Multiscale approach using phytoplankton as a first step towards the definition of the ecological status of reservoirs. *Ecological Indicators* 9(2): 240-255.
- Choi, H.S., 2008. Effect on water quality and fish habitat improvement of Wonju Cheon by instream flow increasing. *Journal of Wetlands Research* 10(3): 57-68 (in Korean).
- Choi H.S., and S.M. Kim. 2013. Optimization of channel structure for fish habitat suitability enhancement. *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(3): 267-276 (in Korean).
- Domingues, R., and H. Galvao. 2007. Phytoplankton and environmental variability in a dam regulated temperate estuary. *Hydrobiologia* 586(1): 117-134.
- Galloway, J.N., F.J. Dentener, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asner, C.C. Cleveland, P.A. Green, E.A. Holland, D.M. Karl, A.F. Michaels, J.H. Porter, A.R. Townsend, and C.J. Vorosmarty. 2004. Nitrogen cycle: past, present and future. *Biogeochemistry* 70: 153-226.
- Hotzel, G., and R. Croome. 1999. A phytoplankton methods manual for australian freshwaters. LWRDC Occasional paper 22/99.
- Hwang, S.J., N.Y. Kim, D.H. Won, K.K. An, J.K. Lee, and C.S. Kim. 2009. Biological assessment of water quality by using epilithic diatoms in major river systems (Geum, Youngsan, Seomjin river), Korea. *Journal of The Korean Society on Water Quality* 22(5): 784-795 (in Korean).
- Jeong, S.M., J.H. Lee, D.H. Kim, and K.R. Oh. 2007. Estimation of optimum flow needed for fish habitat by application of one and two dimensional physical habitat simulation model focused on Zacco Platypus. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 8(1): 117-123 (in Korean).
- Jung, C.G., S.R. Ahn, S.J. Kim, H.J. Yang, H.J. Lee, and G.A. Park. 2013. HSPF and SWAT modelling for identifying runoff reduction effect of nonpoint source pollution by rice straw mulching on upland crops. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(2): 57-57 (in Korean).
- Jung, J.W., 2005. Assessment of nonpoint source pollution loads from a subwatershed in Juam lake using SWAT model. Master's. D. thesis, Chonnam National University (in Korean).
- Jung, S.W., S.H. Park, and J.H. Lee. 2008. Environmental studies in the lower part of the Han river IIX. assessment for water quality using epilithic diatom assemblage index to organic water pollution (DAIpo) in dry season. *Korean J. Environ. Biol.* 26(3): 233-239 (in Korean).
- Kelly, M.G., and B.A. Whitton. 1995. The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* 7(1): 433-444.
- Kim, K.H., S.M. Kim, S.H. Lee, and H. Woo. 1996b. Development of a method for determining the instream flow and its application : II. Application and Result. *Journal of Korea Water Resources Association* 29(5): 185-202 (in Korean).
- Kim, K.H., J.W. Lee, I.P. Hong, and H. Woo. 1996a. Development of a method for determining the instream flow and its application : I. Estimation Method. *Journal of Korea Water Resources Association* 29(4): 161-176 (in Korean).
- Kim, S.J., H.S. Nor, S.J. Hong, J.W. Kwak, and H.S. Kim. 2013. Impact of climate change on habitat of the *Rhynchocypris Kumgangensis* in Pyungchang river. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 289-297 (in Korean).
- Kim, T.J., and O.M. Lee. 2009. Assessment of water quality in the Sum-river and the Dal-stream using epilithic diatom-based indices. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(4): 606-614 (in Korean).
- Kim, Y.J. 2009. Structure of epiphytic diatom communities at the Banwol high and low wetlands in the Shiwha constructed wetland. *Korean J. Limnol.* 42(1): 95-106 (in Korean).
- Kim, Y.J., K.A. Shin, and O.M. Lee. 2009. Water quality assessed by DAIpo and TDI of Bokha stream and Dal stream in South-Han river. *Korean J. Environ. Biol.* 27(4): 414-242 (in Korean).
- K-water, 1995. Development of a Method for Determining the Instream Flow and Its Application. Research Report IPD-95-2 (in Korean).
- Lee J.H., S.M., Jeong, M.H. Lee, and Y.S. Lee. 2006. Estimation of instream flow for fish habitat using instream flow incremental methodology (IFIM) for major tributaries in

- Han river basin. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 26(2B): 153-160 (in Korean).
22. Lee, J.H., and Y.J. Kim. 1996. Epilithic diatoms and trophic states of dam lakes in the Nakdong river system. *Korean J. Environ. Biol.* 14(1): 18-28 (in Korean).
 23. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
 24. National Institute of Environmental Research, 2012. Nitrogen budget of South Korea and management plan (in Korean).
 25. National Institute of Environmental Research. 2013. Nationwide aquatic ecological monitoring program (in Korean).
 26. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. 2001. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000: Draft-April 2001. Temple, TX, USA: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas.
 27. Park B.J., K.H. Kang, and K.S. Jung. 2008. Hydrologic regime alteration analysis of the multi-purpose dam by indicators of hydrologic alterations. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(7): 711-723 (in Korean).
 28. Park, J.Y., 2009. Assessment of future climate change impact on hydrological behavior and stream water quality using SWAT model. Master's. D. thesis, Konkuk University (in Korean).
 29. Park, J.Y., M.S. Lee, Y.J. Lee, and S.J. Kim. 2008. The analysis of future land use change impact on hydrology and water quality using SWAT model. *Korean Society of Civil Engineers* 28(2b): 187-197 (in Korean).
 30. Park S., J. Kim and I.H. Ko. 2009. Evaluation of eco-hydrological changes in the Geum river considering dam operations : II. Hydraulic Fish Habitat Condition Analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(5): 407-414 (in Korean).
 31. Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50(4): 1031-1036.
 32. Choi, J.Y., 2002. Management of nonpoint pollution by reducing storm runoff, RE03. Korea Environment Institute (in Korean).
 33. Sung, Y.D., B.J. Park, K.J. Koo, and K.S. Jung. 2005. The estimation of ecological flow recommendations for fish habitat. *Journal of Korea Water Resources Association* 38(7): 545-554 (in Korean).
 34. U.S. EPA. 2002. Biological Assessments and Criteria: Crucial Components of Water Quality Programs.
 35. Watanabe, T., K. Asai, and A. Houki. 1990. Numerical simulation of organic pollution in flowing water. *Hazardous Waste Containment and Treatment* 4: 251-281.
 36. Watanabe, T., K. Asai, A. Houki, S. Tanaka, and T. Hizka. 1986. Saprophylic and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAIpo). *Diatom* 2: 23-73.
 37. Watanabe, T., T. Ohtsuka, A. Tuji, and A. Houki. 2005. Picture book and ecology of the freshwater diatoms. Uchida rokako, Tokyo.
 38. Woo, H., J.W. Lee, and K.H. Kim. 1998. Development of a method for determination of instream flow needs required for fish habitat conservation -application to the Keum river-. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* 18(2-4): 339-350 (in Korean).