

# 독높이기 농업용저수지의 운영을 통한 하천 수질개선 효과 분석

## Analysis of Water Quality Improvement in Downstream River of Heightening Irrigation Dam through the Reservoir Operation

지 용 근\* / 이 미 선\*\* / 이 진 희\*\*\* / 장 재 호\*\*\*\*

Jee, Yong-Keun / Lee, Mi-Seon / Lee, Jin-Hee / Jang, Jea-Ho

### Abstract

In recent years, interest in river environment such as riparian landscape, water quality and ecological conservation has been growing with increasing recreation on agricultural river watershed. That caused the increase of necessity of water resources development, one of solutions for the diversification of agricultural water demand and shortages. In this respects, heightening irrigation dam, as a part of the 4-major river restoration project, is necessary to secure not only additional agricultural water but also instream flow for water quality improvement. However, operation plan of irrigation dam still not be clear. In this study, additional storage which secured through heightening irrigation dam was estimated using SWAT model. And instream flow effects on water quality of downstream were evaluated. The findings show that the additional water supply will contribute positively to water quantity and quality of downstream. The results show a 2~10% water quality improvement effect on nutrients, as well as an 1~8% water quantity increasing effect. In particular, additional storage can be effectively supplied from February to April by the reservoir operation. However, maintaining better water quality in irrigation reservoirs is important because the water quality of irrigation reservoirs can be negatively impacts the water quality in downstream of reservoirs.

**Keywords** : environmental improvement in downstream, heightening irrigation reservoirs, reservoir operation, SWAT model, water resource security

### 요 지

최근 농업용저수지를 포함한 농촌지역 하천의 친수활동이 증가하면서 농촌수계의 경관, 수질 및 생태보전 등 환경에 대한 관심이 고조되고 있고, 이로 인해 농촌지역 용수수요 다변화와 물 부족 심화현상 등을 해결할 수 있는 수자원 개발의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 측면에서 4대강 살리기 사업의 일환으로 추진되는 농업용저수지 독높이기 사업은 추가로 필요한 농업용수뿐만 아니라 하천 수질개선을 위한 하천유지용수 확보를 위해 필요한 사업임에도 불구하고 운영계획 및 운영방안이 명확하지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 낙동강의 특정 소유역을 대상으로 농업용저수지 독높이기 사업을 통해 확보할 수 있는 추가 저수량을 검토하였고 저수지 운영방안에 따라 하천유지용수로 방류할 경우 하류하천 수질개선효과를 평가하고자 하였다. 저수지 운영시나리오에 따른 추가적인 물공급량 확보는 하류하천 수량과 수질에 영향을 줄 것으로 예측되었으며

\* 한국환경정책·평가연구원 정책연구본부 물환경연구실 초빙연구원

Invited Research Fellow, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

\*\* 국립환경과학원 수질총량연구과 금강수계센터 전문위원

Research Fellow, Water Pollution Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-170, Korea

\*\*\* 한국환경정책·평가연구원 환경평가본부 환경평가1실 부연구위원

Research Fellow, Div. of Environmental Assessment I, Korean Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea,

\*\*\*\* 교신저자, 한국환경정책·평가연구원 정책연구본부 물환경연구실 초빙연구원 (e-mail: jhjang@kei.re.kr, Tel: 02-6922-7840)

Corresponding Author, Invited Research Fellow, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

유량은 1~8%의 증가효과와 2~10%의 수질개선효과를 나타냈다. 특히, 저수지 운영상 2월에서 4월 사이에 추가로 방류를 실시할 수 있으며, 하천의 수량 및 수질 개선에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 농업용저수지의 수질은 지류하천뿐만 아니라 낙동강 본류 수질에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 저수지 수질개선 및 관리가 중요할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 하류하천 수질개선, 농업용저수지 독높이기 사업, 저수지 운영, SWAT 모형, 수자원 확보

## 1. 서 론

우리나라 수리시설물 수는 약 69,000여개에 이르고 있으며, 이 중 농업용저수지는 약 17,600여개로 약 25%의 비중을 차지하고 있다(농림수산식품부, 2010). 농업용저수지는 농업용수의 이수, 지류하천의 하천유지용수 확보, 저수량 확보 및 홍수조절능력 증대기능을 하는 등 주요 농업기반시설로서의 역할을 담당하고 있으며, 농업용수 공급에 있어서 약 60%를 농업용저수지에서 공급하고 있다. 최근에는 삶의 질 향상으로 친수활동이 증가하면서 하천의 경관, 수질 생태보전 등 환경적 기능에 대한 관심과 더불어 이의 개선에 대한 사회적 측면의 요구뿐만 아니라 물 부족 심화현상과 농촌지역의 용수수요 다변화로 인하여 지역적 수자원 개발의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 상황에서 4대강 살리기 사업의 일환으로 추진되는 농업용저수지 독높이기 사업은 96개 저수지 독높이기로 한강 0.1억 m<sup>3</sup>, 낙동강 1.0억 m<sup>3</sup>, 금강 0.6억 m<sup>3</sup>, 영산강 0.7억 m<sup>3</sup>, 섬진강 0.1억 m<sup>3</sup> 등 총 2.4억 m<sup>3</sup>의 수자원을 확보를 통해 장래 물 부족 대비 및 미래 농촌용수 수요 다양화에 대비하도록 하고 있다(국토해양부, 2009).

기존의 농업용저수지는 특성상 논농사 기간의 작부체계에 맞는 용수공급과 홍수기 재해대비를 위해 저수물관리를 하는 비교적 간단한 물관리 방안을 적용하고 있었으나, 독높이기 사업 후 하천 수질개선을 위한 하천유지용수 개념의 용수수요도 발생하고 있어 농업용저수지에서의 용수공급능력을 검토하여 이에 유연하게 대응할 수 있는 효율적인 저수지 운영방안이 검토되어야 할 것이다. 이에 김필식과 김선주(2006)는 저수관리시스템을 이용하여 관개기와 홍수기 등의 기간별 관리 저수위 설정을 통해 무효방류량을 최소화할 수 있는 저수관리기법을 제시함으로써 효율적이고 탄력적인 농업용저수지 운영 방안을 제시하고자 하였으며, 이광야 등(2011)은 농업용저수지 독높이기 사업 후 달라지는 용수공급목적에 따라 기왕의 경험적 용수공급에서 탈피한 물관리 운영 표준안을 개발하고자 하였다. 최낙원(2010)은 신규저수지와 확장저수지의 연계운영을 통해 수자원이용률이 낮은 농업용저수

지의 하천유지용수뿐만 아니라 생·공용수 등의 미래 수자원 확보방안을 제시하였다. 김남원 등(2007)은 팔당댐을 중심으로 소양강 및 충주 다목적댐의 운영에 따른 유황변동 특성을 정량적으로 분석, 평가하고자 하였으며 이를 위해 SWAT-K를 모형을 이용하여 소양강과, 충주댐의 구축여부에 따른 유출거동을 모의한 결과, 소양강댐의 경우 연간 약 63일간에 걸쳐 9.1억 m<sup>3</sup>/년의 물을 저장하고, 충주댐의 경우에는 약 28일간에 걸쳐 12.5억 m<sup>3</sup>/년의 물을 저장하여 나머지 기간에 유황을 개선하는 것으로 나타났다. 한강수계관리위원회(2006)는 SWAT-K 모형을 적용하여 한강유역 오염총량관리 단위유역을 대상으로 모형의 “댐방류량 방법”을 이용하여 유역 내 하천유지가능 유하량을 해석하였다.

한편, 농업용저수지와 같은 인공시설물 운영에 따른 하류하천의 수문과 수질영향을 분석하기 위해서는 유역의 기상조건에 의한 유출과 오염원 유입을 충분히 고려할 수 있는 유역모델의 적용이 필요하다. 저류 시설의 방류로 인한 영향 분석은 최근 가뭄 관리, 수자원 관리, 그리고 하류 생태 및 환경에 중요성이 강조되어 활발히 연구되고 있다. Sophocleous et al. (1999)은 수공구조물과 농업용수 이용변동에 따른 장기하천 유출 및 지하수 흐름에의 영향 분석을 SWAT와 MODFLOW의 연계를 통해 Kansas지역에 적용한 결과, 상류 저류 구조물의 하류 하천 유출에 약 5~11% 가량, 지하수 저류량에 약 5% 가량 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 신현석과 강두기(2006)는 SWAT 모형의 저류시설 메커니즘을 이용하여 복잡한 다양한 저류 시설물의 장기 하천 유출에의 영향 분석을 위하여 다양한 요소 중 용수공급량 변동, 저류지 바닥 수리전도도에 따른 영향 및 하천 유지용수 공급에 따른 영향 분석을 정량적으로 수행하기 위한 기법 및 방향을 제시하였다. 이용준 등(2008)은 SWAT 모형을 이용하여 유역 내 농업용저수지의 운영이 직하류 하천유출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 안성천 유역을 대상으로, 유역 내 고삼과 금광 농업용저수지의 방류량 반영여부에 따른 하천유출 영향과 관개기 및 홍수기의 저수지 유량변화를 분석하였다.

앞서 언급하였듯이 농업용저수지의 경우 확정된 운영

안이 없고 독높이기 사업으로 인해 용수공급목적이 변경 되었으므로 때문에 용수이용효율이 낮은 농업용저수지에 대해 시기별로 계획된 용수의 확보가 가능한지에 대한 검토가 필요하다. 또한 확보된 수량의 하천유지유량 공급효과와 이에 따른 하천의 환경개선효과를 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 농업용저수지의 10년 빈도 갈수 유입량 분석을 통해 가용할 수 있는 시기별 저수량을 파악하고, 공급가능한 하천유지유량을 방류할 경우 하천의 환경개선 효과를 평가하고자 하였다. 대상유역의 경우 하류부 하천의 수량/수질측정망 자료를 활용하여 수량 및 수질의 변화를 용이하게 파악할 수 있는 감천유역을 선정하였고, 지류하천의 농업용저수지 방류 시나리오에 따라 하류 유황변화와 이에 따른 영양물질에 대한 수질개선 효과를 검토하였으며, 독높이기 사업으로 인한 농업용저수지 운영방안 수립에 기초자료로서 활용되고자 하였다.

## 2. SWAT 모형

농업용저수지 운영 및 하류부하천의 환경개선 등을 평가하기 위해 저류메카니즘과 저류요소에 대한 묘사가 용이한 SWAT 모형(Soil and Water Assessment Tool; Neitsch et al., 2004)을 적용하였다. SWAT 모형은 USDA Agricultural Research Service에서 개발하였으며 대규모의 복잡한 농촌유역에서 장기간에 걸친 유역 내의 장기 강우-유출, 유사이동, 농화학물질 등을 예측하는 준분포형 유역모형이다. 수문순환 과정은 SCS 곡선법 또는 Green-Ampt 침투방정식을 이용한 지표수유출, 토양층에서의 침투 및 침투, 지표하유출, 지하수 순환, 증발산, 하도에서의 이송손실, 저류시설물 요소 등으로 구분된다(Arnold and Fohrer, 2005; Neitsch et al., 2004). 국내에서는 주로 수자원계획을 위한 실무적인 장기 강우-유출 모형화 연구(박정규, 2007; 이은형과 서동일, 2011) 등이 폭넓게 수행되었으며, 이때 검토된 모형은 가지야마 공식에서부터 SSARR 모형 등 다양하다. 또한 GIS 및 위성정보를 이용하여 댐건설 전후의 자연환경 변화에 관한 연구가 NWS-PC 모형을 기반으로 하는 저수지의 운영 효과 및 기타 하류 하천 유출을 고려한 연구가 수행되기도 하였다(한국수자원공사, 1997).

### 2.1 저류시설 모의

SWAT 모형 내에서 고려될 수 있는 주요 저류시설물 요소들은 저수지(reservoir) 요소, 유역 내 저류 및 습지(pond and wetland) 요소, 하도저류(bank storage) 요소,

유역 요면저류(depression storage) 요소 등 4가지로 구분될 수 있는데, 이들 요소들은 모형 내에서 저류 및 운동방정식에 의하여 개괄적으로 고려되지만 HRU 및 수문추적과 연계되어 효과적으로 저류효과를 모의할 수 있다. 특히 저수지 요소는 상류의 자연 및 인공 저수지의 조절 효과 및 바닥에서의 침투효과를 통한 하류 장기유출 영향을 분석할 수 있으며, 이와 분리되어 유역 내 저류지 및 습지 요소는 유역 내 소규모 농업용저수지 및 자연습지 등에 의한 영향을 고려할 수 있다. 또한 유역 요면저류 요소는 도시 및 농경지에서 강우시 단기간에 발생하거나 인위적인 물 사용에 대한 수문학적 손실효과로 고려되며 하도 저류 요소는 하상으로부터 하천수의 손실을 의미한다(신현석과 강두기, 2006). 본 연구는 위의 요소들이 완벽한 물리적 메커니즘을 가지고 구동되기에는 연구가 충분하지 않다. 그러나 농업용저수지를 대상으로 한 수문학적 접근이라는 점과 저수지 증고사업으로 인한 확보된 용수를 이용하여 하천환경에 미치는 영향을 평가하는데 의의를 둘 수 있다.

모형에서 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음 Eq. (1)과 같으며, 지표유출량을 계산하기 위해 SCS-CN (Curve Number) 방법을 사용한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 는 최종의 토양수분량(mm),  $SW_0$ 은  $i$ 일의 초기토양수분량(mm),  $t$ 는 시간(일),  $R_{day}$ 는  $i$ 일의 강수량(mm),  $Q_{surf}$ 는  $i$ 일의 지표유출량(mm),  $Ea$ 는  $i$ 일의 증발산량(mm),  $W_{seep}$ 는  $i$ 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm),  $Q_{gw}$ 는  $i$ 일의 회귀수량(mm)이다.

SWAT 모형에서 고려하고 있는 저류요소는 저수지, 소유역내 저류지 및 습지, 유역내 요면, 지호 등이 있으며, 각 저류 요소들은 다음 Eq. (2)와 같이 일반적인 물수지 방정식으로 표현된다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 저류량,  $V_{stored}$ 는 초기 저류량,  $V_{flowin}$ 는 유입량,  $V_{flowout}$ 는 유출량,  $V_{pcp}$ 는 강수량,  $V_{evap}$ 는 증발량,  $V_{seep}$ 는 저류지 바닥에서 침투로 인한 손실량으로, 각 요소는 방류방식에 따라 차이를 보이고 있다.

다목적 댐과 같은 대형 댐의 저수지의 유출량 또는 방류량의 경우는 관측 일유량법이나 관측 월유량법을 적용하

며, 보시시설이나 농업용저수지와 같은 비조절 저수지의 경우에는 평균 연방류율법 또는 조절 저수지에 대한 목표 방류량법 등 4가지 방식으로 접근한다(Neitsch et al., 2004). 본 연구에서는 저수지 하류의 하천환경에 대한 영향을 분석하기 위하여 저수지가 저수용량을 초과한 경우의 월류를 허용하는 비조절저수지법과 하류의 하천 유지용수 공급을 모의하기 위한 조절 목표방류량법을 적용하였다.

## 2.2 영양물질

SWAT 모형은 영양물질 추적을 위해 QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987)의 하천수질 동역학을 응용하고 있으며, 이는 하천 내 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적하게 된다. 토양입자에 붙어 있는 영양물질은 하도를 통해 지표수로 유출되어 이송되는데 이러한 질소와 인은 HRU에서의 유사량과 밀접하게 관계하며 유사량의 변화에 큰 영향을 받는다. 또한 질소순환은 물, 대기, 토양을 포함하는 동적 시스템으로서 식물에게는 탄소, 산소, 수소 다음으로 필요한 것이 바로 질소이다. 질소는 식물의 흡수, 침출, 휘발, 탈질 그리고 침식에 의해 제거되며, 지표유출, 지표하유출, 침투 등을 통해 이송된다(Neitsch et al., 2004). 이동성이 강한 질소와는 달리 인의 용해성은 대부분의 환경에서 제한적이며, 다른 이온들과 결합하여 여러 종류의 불용성 화합물을 이루면서 용액으로부터 침전된다. 이러한 특성으로 인해 토양 표면 근처에 인이 축적되고, 이는 지표유출에 의해 쉽게 이동하게 된다. Sharpley and Syers (1979)에 의하면 대부분의 유역에서 인 유출의 주요 기작은 지표유출에 의한 것으로 알려져 있다.

## 2.3 최저유입량 분석

본 연구에서는 갈수빈도해석을 위해 Type-III 극치분포모형을 적용하여 최저유입량을 분석하였으며, 재현기간은 농업용수 계획설계기준에 따라 10년을 적용하였다. 하천에서의 갈수량의 최소값은 "0"이므로 이것이 분포의 하한이 되며, 분포의 하한이 "0"일 경우 확률밀도함수는 Eq. (3)과 같다.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad x \geq 0 \quad (3)$$

여기서,  $(\alpha)$ 는 형상변수이면  $(\beta)$ 는 축척변수이고  $x \geq 0$ 이다. Eq. (3)은 2변수 Weibull분포라고도 부르며, 적분하면 Eq. (4)와 같은 누기확률분포함수를 얻는다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

매개변수 추정에는 모멘트법을 사용하였으며, Type-III 극치분포의 빈도 계수는 Eq. (5)와 같다.

$$K_T = A(\alpha) - B(\alpha) + B(\alpha) [\ln T - \ln(T-1)]^{1/\alpha} \quad (5)$$

여기서,  $T$ =재현기간,  $A(\alpha)=[1 - \Gamma(1+1/\alpha)]B(\alpha)$ ,  $B(\alpha)=[\Gamma(1+2/\alpha) - \Gamma^2(1+1/\alpha)]^{-1/2}$ 이다.

## 3. 대상유역 및 모형구축

### 3.1 연구대상유역

본 연구에서 농업용저수지 득높이기 사업에 따른 하류 하천의 환경영향 분석을 위해 선정된 대상유역은 감천유역으로, 구미시가 위치하는 낙동강 본류와 접하고 있는 낙동강 제1지류로서 유역면적은 1,018.2 km<sup>2</sup>, 유로연장은 72.6 km이며, 낙동강 전체 유역의 4.3%를 차지하고 있다 (Fig. 1). 감천유역 중 무을저수지와 옥성저수지를 포함한 일부 유역을 대상으로 연구를 수행하였다(Table 1).

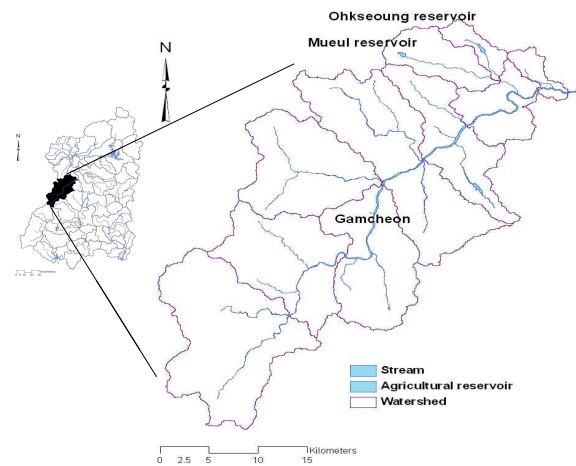


Fig. 1. Location of Study Area and Reservoirs

Table 1. Dimension of Mueul-reservoir and Okseong-reservoir

Reservoirs	Completion	Type	Length (m)	Height (m)	Width (m)	Effective Storage (103 m <sup>3</sup> )
Mueul	1970	Fill dam (Zone type)	383.7	17.2	5.5	1,387.4
Okseong	1948	Fill dam (Zone type)	229.0	14.4	5.0	1,852.5

### 3.2 SWAT 모형의 구축 및 보정

SWAT 모형을 구축하기 위해서 GIS 기반의 공간입력자료인 수치고도모델(DEM)은 국가수자원관리 종합정보(resolution; 30 m)로부터 제공받았다. SWAT 모형의 소유역 자동분할 기능을 사용하여 하천도 및 대상유역의 경계를 추출하였으며, 총 10개의 소유역으로 분할하였다(Fig. 2a). 토지이용도는 환경부 환경지리정보서비스(<http://egis.me.go.kr/egis>)에서 최근에 작성된 1:25,000 해상도의 중분류 토지피복도를 사용하였다. 토양의 물리적 특성 및 화학적 특성은 농업과학기술원에서 운영 중인 한국토양정보시스템(<http://asis.rda.go.kr>)의 자료를 사용하였으며, 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의

물리적인 값은 한국건설기술연구원에서 제공하는 HyGIS Soil DB에서 추출하여 사용하였다. 이상의 모형의 지형자료 구축결과는 Fig. 2와 같다.

감천유역의 토지이용형태는 산림 65.1%, 농경지 27.0%, 도시지역 3.8%로 분석되었으며(Fig. 2c), 토양은 Geumjin (33.8%)과 Geunsan (22.95%)이 두드러지게 나타났다. 표토성분은 Geumjin 사양토 및 미사질 양토, Geunsan은 양토로 배수상태는 각각 불량과 양호한 토양이다. 일강우량 자료를 구축하기 위해 낙동강 유역의 공간특성을 균일하게 반영하며, 2009년까지 15개년 이상의 자료를 보유한 지점을 대상으로 총 56개 지점을 선정(국토해양부 35개 지점, 기상청 21개 지점)하여 격자범용크리깅(Block universal crigging)기법 적용을 통해 면적평균강우량을 산정하였

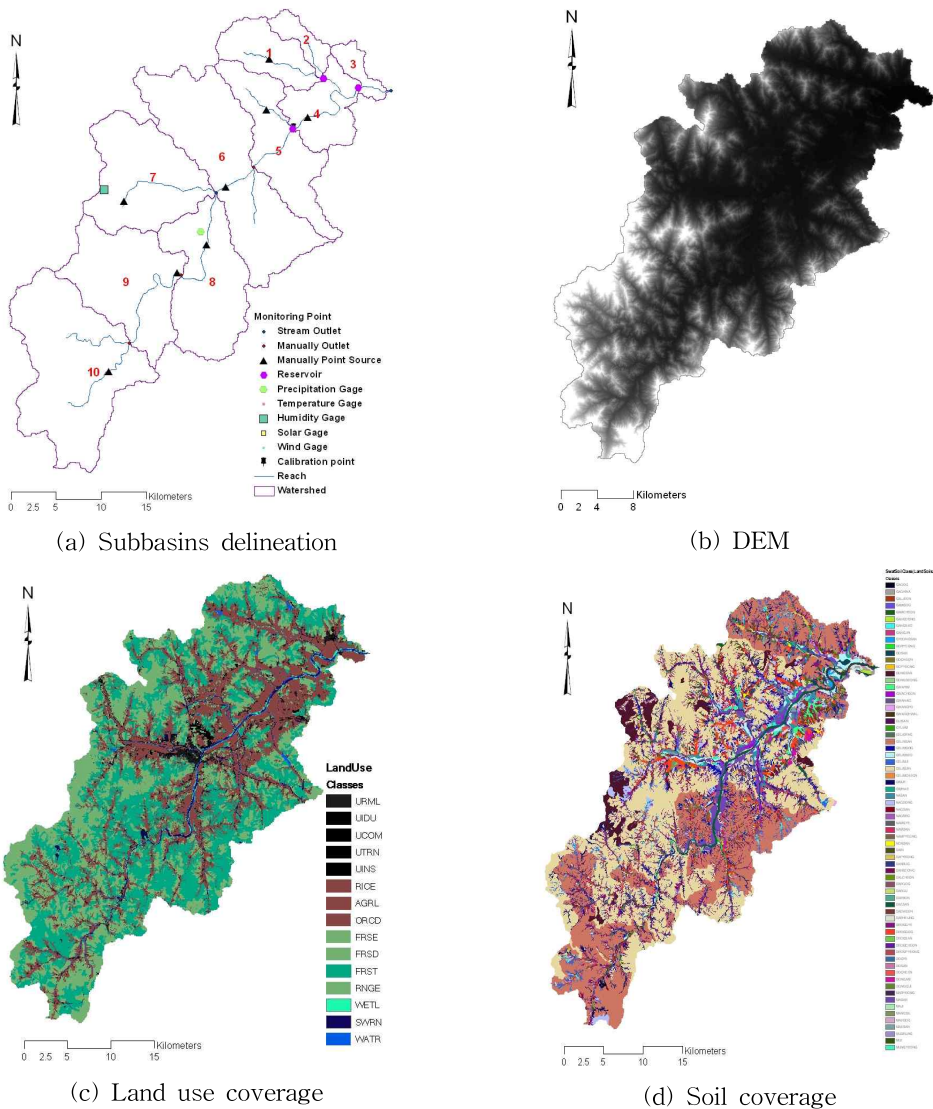


Fig. 2. GIS Database of Gamcheon Watershed

다. 산정된 면적평균강우량 중 감천유역을 대상으로 모형에 입력한 기상자료는 강우지점 1개소와 최대·최소온도, 풍속, 일조량, 상대습도 등의 기상자료는 구미관측소의 자료를 수집하여 입력자료를 구축하였다. 모형의 유량 및 수질보정은 수질오염총량관리를 위해 낙동강 물환경연구소에 의해 8일 간격으로 관측되고 있는 지점 중 감천 A지점의 2007년 1월부터 2009년 12월까지의 유량과 수질자료를 사용하였다.

기상자료와는 달리 생활용수 및 공업용수와 관개용수와 같은 조절유량, 즉 순물공급량은 상수도 통계연보(환경부, 2008)를 이용하여 소유역별 생·공용수량을 산정하였다. 관개용수량의 경우 강우량 및 수정 Penman식에 의해 산정된 증발산량 등을 이용하여 산정한 자료를 적용하였으며, 하천으로의 회귀는 취수량의 35% 수준으로 가정하여 계산하였으며, 각 소유역별 생·공용수량과 관개용수량은 Table 2와 같다

수질 모의를 위한 자료로서 비점오염 모의뿐만 아니라 점오염원을 고려하기 위해 유역 내 각 환경기초시설(하수종말처리시설, 마을하수처리시설, 분뇨처리시설, 공단 및 축산폐수처리시설)에 대한 시설용량 및 일별 배출부하량 자료를 조사해야한다. 따라서 2007년 전국 오염원조사보고서에 기초하여, 유역 내 환경기초시설 총 17개소(하수종말처리시설 1개소, 마을하수처리시설 16개소)에 대한 정보를 이용하였다. 환경부 수질관측망 자료 중 질소(유기질소, 질산염, 아질산염, 암모늄), 인(유기인, 인산염)의 형태별 농도로부터 태별 비율을계산하여 각 질소, 인의 형태별 배출부하량을 소유역별로 산정하였다. 또한 처리시설별 방류수 수질기준인 10~20 mg/L을 지역에 따라 달리 적용하여 각 소유역별 부유물질 배출부하량을 산정

하였다.

### 3.3 모형의 적용성 평가

SWAT 모형의 모의기간은 총 5년(2005~2009)이며, 이중 2005년과 2006년은 모의기간의 안정화를 위해 추가 모의하였다. 모형의 보정은 감천 A지점을 대상으로 2007년부터 2009년까지 수행되었으며, 연중 일별자료를 중심으로 이루어졌다. 매개변수 보정 방법에는 크게 시행착오법과 최적화기법에 의한 자동보정법이 있는데, 자동보정법의 경우 한 개의 보정지점 당 모형 계산시간이 상당히 길기 때문에 본 연구에서는 민감도 분석 및 선행연구를 참고하여 유량 및 수질에 적절한 매개변수를 선정하여 허용범위 내에서 변화시키면서 단순시행착오법에 의해 보정하였다. 실측값에 대한 모의결과의 정확성과 상관성을 평가하기 위해 Eqs. (6)~(8)처럼 % *difference* (ASCE, 1993), *NSE* (Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수(Coefficient of Determination,  $R^2$ ), *RMSE* (Root Mean Square Error)를 산정하였다. 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 설정하기 위해 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 Donigan (2000)이 제시한 조건을 참조하여, 유량의 경우 % *difference* ≤ 25와 *NSE* ≥ 0.7을, 수질의 경우 % *difference* ≤ 35와 *NSE* ≥ 0.5를 만족할 때까지 보정을 실시하였다(안중호 등, 2010).

$$\% \text{ difference} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

Table 2. Quantity of Water Intake for each Sub-basin (unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/yr)

Sub-basin	Residential and industry water	Agricultural water	Total
*GC-1	71.59	81.78	153.37
GC-2	27.36	31.25	58.61
GC-3	23.30	26.62	49.92
GC-4	78.67	89.87	168.53
GC-5	159.32	149.34	308.657
GC-6	320.49	300.43	620.92
GC-7	215.94	202.42	418.56
GC-8	207.01	194.05	401.06
GC-9	217.21	203.61	420.82
GC-10	340.40	319.09	659.49

$$RSME = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (8)$$

여기서,  $P_i$ 는 예측 값,  $O_i$ 는 실측값,  $n$ 은 데이터 수, 그리고  $\bar{O}_i$ 는 실측값의 평균이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 모형의 보정

SWAT 모형의 유량보정은 지표 및 기저유량에 대한

보정, 침투유량 및 감쇄곡선의 형태에 대한 보정, 그리고 수질보정 순으로 수행하였다. 측정망 자료에 대한 2004년부터 2009년까지 수행된 유량 및 수질 보정 결과는 Fig. 3과 같으며, 실측자료를 이용한 모형효율 등의 평가 결과는 Table 3에 나타내었다.

유량의 경우 보정기간에 대한 % *difference*는 -24.47%, *NSE*는 0.81로 적정 수준이상으로 보정목표치내에서 모의되었다. % *difference*가 음의 값으로 다소 높게 산정된 이유는 모의에 이용된 관측 자료가 저유량 시기의 실측자료가 대부분이기 때문에 평수기 유량 이하의 유출량 모의

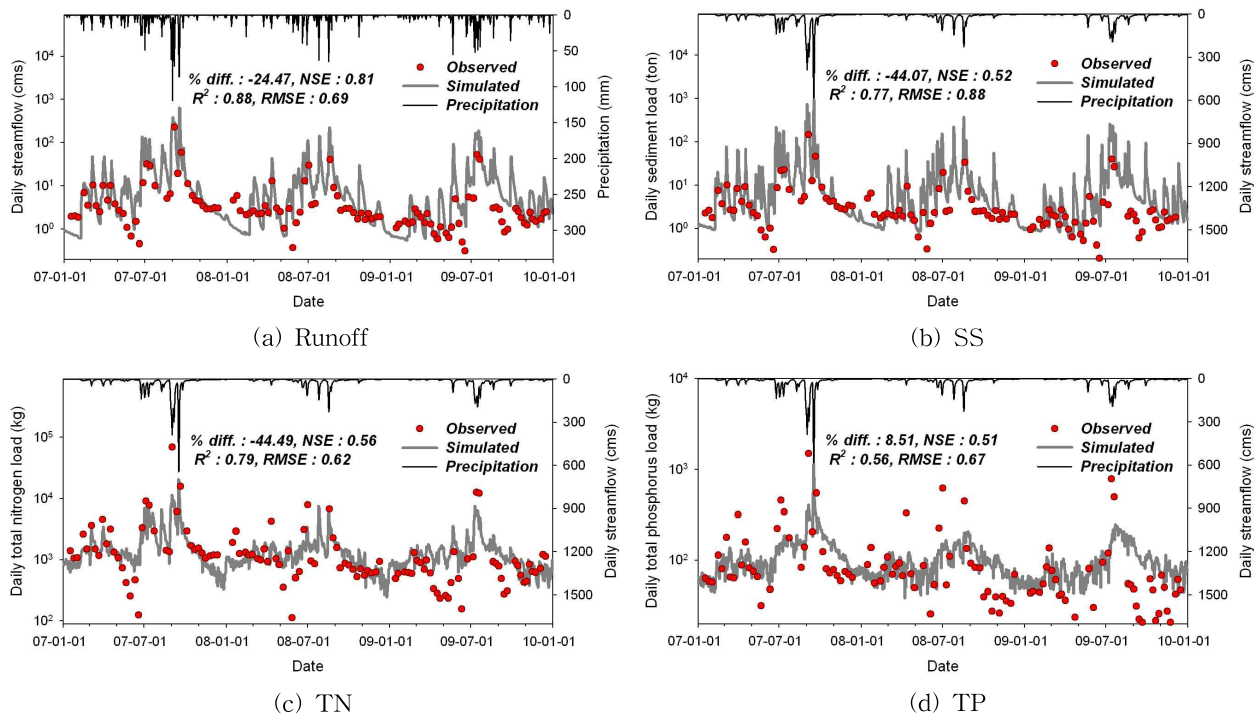


Fig. 3. Calibration Results of SWAT model

Table 3. Calibration Result of SWAT Model

Contents		Average	% <i>difference</i>	<i>NSE</i>	$R^2$	<i>RMSE</i>
Flow (cms)	Obs.	7.66	-24.47	0.81	0.88	0.69
	Sim.	9.53				
SS (ton/day)	Obs.	5.91	-44.07	0.52	0.77	0.88
	Sim.	8.51				
TN (kg/day)	Obs.	2,319.20	-44.49	0.56	0.79	0.62
	Sim.	2,632.15				
TP (kg/day)	Obs.	91.00	8.51	0.51	0.56	0.67
	Sim.	98.14				

는 잘 반영되었으나, 홍수기 등 유량이 풍부한 시기의 유량모의는 한계가 있다. 또한, 보정에 사용된 8일 간격 유량은 그 변동 가능성이 높은 특성을 지니고 있다. 즉, 특정 지점 또는 특정년도의 유황자료는 연 유량 크기의 분포를 평균적으로 반영하는데 한계가 있음을 상기해야만 한다. 따라서 오염총량 8일 간격 측정자료의 홍수기 유량한계를 보완하기 위하여 국토해양부의 감천지점의 일간격 유량 측정자료를 이용하여 홍수기 유량모의를 보완하였다(강형식 등 2011). 또한 선형회귀분석에 의한 결정계수( $R^2$ ) 및 통계지수( $RMSE$ )는 각각 0.88과 0.69의 값으로 분석되어 실측값과 모의값 간의 의미가 있는 것으로 나타났다.

고형물 표면에 흡착된 질소와 인 성분은 강우시 유사이동에 큰 영향을 받으므로 수질의 보정은 SS, TN, TP 순서로 수행하였다. 모의값과 실측값을 비교하였을 때, 모의기간 동안 감천A지점 SS 항목의 % *difference*는 44% 수준으로 실측값과의 차이가 많이 존재한다. *NSE*의 경우는 0.52로 유량과 비교하여 낮지만 모의값이 실측값의 경향을 따라가는 것을 볼 수 있다. TN의 경우 모의기간에 걸쳐 % *difference*가 44.5%를 나타냈고, *NSE*는 0.56의 값을 나타내었다. TP의 경우 % *difference*가 8.5% 수준을 나타내어 모의값이 실측값과 근접한 것으로 평가되었으나, *NSE*는 0.51로 다소 낮게 산정되었다. 각 수질항목에 대한 통계지수( $RMSE$ )는 비교적 낮은 0.62~0.88 범위를 나타내었다. 선형회귀분석을 통한 결정계수를 산출한 결과, Flow, SS, TN의 경우 실측값과 모의값이 1:1라인을 중심으로 집중되어 있으며  $R^2$ 값이 0.7 이상으로 유의한 반면에 TP의 경우 전반적으로 유의성이 낮게 분석되었다. 수질항목의 경우 경험적인 매개변수와 복잡한 과정을 통해 모의되는 유역모델링의 특성과 수질 메커니즘이 복잡·다양한 유역의 공간적 특성을 고려할 때 수용 가능한

결과로 판단되며, 본 연구의 결과도출에 있어 신뢰성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 최소 유입량과 이용가능 수량

농업용저수지의 주목적에 따라 관개용수 확보가 가능하도록 저수위 거동분석결과와 10년 빈도 필요저수량을 사용하였으며, 전년도 대비 확보해야 하는 최소수위 산정 방법(김필식과 김선주, 2006)을 통하여 옥성저수지에서 확보해야만 하는 최저수위를 산정하였다. 또한 2007년 1월부터 2009년 12월까지의 평균유량이 저수지로 유입할 경우 확보 가능한 저수위를 저수지거동분석을 통하여 산정하였다. 그 결과, 옥성저수지의 하천유지용수 공급계획량인 451.6천  $m^3/yr$ 을 공급할 수 있는 시기는 하천유지용수로 이용 가능한 수량이 발생하는 1~4월, 7~12월인 것으로 분석되었다(Fig. 4). 이 중에서 저수지의 원활한 관개용수 공급을 위해 수위를 확보하고 유지해야하는 10~1월과 강우량이 풍부한 시기인 7~9월을 제외할 경우, 계획량의 공급가능한 시기는 2~4월(90일)인 것으로 분석되었으며, 하천유지용수로 이용 가능한 수량은 2월, 3월, 4월에 각각 166.8천  $m^3$ , 166.8천  $m^3$ , 179.4천  $m^3$ 인 것으로 나타났다.

#### 4.3 농업용저수지의 운영방안 모의

유역 내 저류시설물의 유출변동을 고려한 시나리오를 작성하였고, SWAT 모형의 여러 가지 인공 저류시설에 대한 모듈 중 조절 저수지에 대한 목표 방류량 기법을 선택하여 하류하천의 수문·수질영향을 평가하였다(Table 4). 각각의 농업용저수지의 용수공급목적에 제약이 없는 범위에서 공급 여유량을 산정한 결과, 무을저수지와 옥성저수지 각각의 일 최대 공급 가능수량은 각각 0.81  $m^3/s$ 와

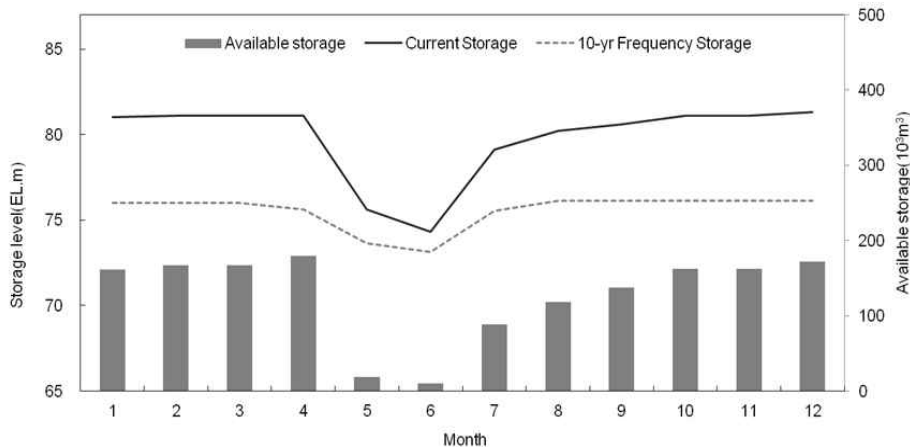


Fig. 4. Monthly Storage Level Management



**Table 4. Scenarios for each Reservoir (unit: m<sup>3</sup>/s for a month)**

Scenarios	Mueul	Okseong	Remark
Base (after bank raising)	discharge: 0	discharge: 0	<i>Fixed condition:</i> <i>*RES_K=0.1</i> <i>**WURES_N(mon)=0</i>
# 1	discharge: 0.1 increasement	discharge: 0.2 increasement	
# 2	discharge: 0.2 increasement	discharge: 0.4 increasement	
# 3	discharge: 0.5 increasement	discharge: 0.8 increasement	

\* : Hydraulic conductivity of the reservoir bottom(mm/hr)

\*\* : Average amount of water withdrawn from reservoir each day in the month for consumptive use (104 m<sup>3</sup>)

0.53 m<sup>3</sup>/s이며, 사수량의 경우 0.25 m<sup>3</sup>/s와 0.22 m<sup>3</sup>/s로 나타났다. 이를 토대로 방류량 증가효과와의 상대적인 비교를 위하여 무방류 조건의 Base 시나리오를 설정하였고, 무을저수지는 0.2 m<sup>3</sup>/s, 0.4 m<sup>3</sup>/s, 0.8 m<sup>3</sup>/s와 옥성저수지는 0.1 m<sup>3</sup>/s, 0.2 m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/s의 조건으로 연중 일정하게 방류하는 것으로 가정하였다. 물론, 본 연구에서 가정한 각각의 시나리오는 낙동강 본류 수량과 비교하면 상당히 작지만 낙동강 유역은 주요 지류가 본류의 수질을 악화시키는 주요 원인이기 때문에 지류하천부터 수량 확보가 우선되어야 수질 개선에도 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 농업수산식품부(2009)에서 조사한 농업용수 수질측정망 조사 보고서에 따르면 전국 800여개 저수지의 수질을 지속적으로 측정하고 있으며 수질기준 달성률이 80% 수준으로 높게 나타나고 있지만 지속적인 수질측정 및 수질관리가 많이 미흡한 것이 현실이다. 낙동강 살리기 사업 후 수질 II등급 이상을 목표로 하고 있는 것을 고려했을 때, 하천유지용수공급을 통한 수질개선효과를 얻기 위해서는 농업용저수지 자체의 수질개선이 선행되어야만 한다. 본 연구에서는 농업용저수지 상류유역의 수질관리를 통해 호소수질환경기준 III(보통)등급 달성(영양물질)을 가정하여 모의하였다. 저수지저류 및 하도저류에 영향을 미치는 저수지 바닥의 수리전도도와 침투계수는 default값으로 최소값(0.1 m<sup>3</sup>/s)을 사용하였다. 이러한 모의 및 기법 제안의 목적은 4대강 살리기 사업의 일환으로 독높이기 사업 후 수자원 운영계획 시 적절한 하천유지용수량을 산정하고, 상류 저수지로부터의 이용가능한 하천유지용수 공급량을 시·공간적으로 조절할 수 있는 기초적인 연구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.4 저수지 증고 효과

앞서 제시한 시나리오에 따라 각각의 저수지로부터 월류하여 하천을 유하한 후 각 지천이 합류하여 일정구간을

유하한 특정지점에서의 연도별 평균유출량과 수질변화, 월별 평균유출량과 수질변화 산정결과를 Base 시나리오와의 상대적인 증감 차이로 비교하였다. 한편, 본 연구에서 고려하지 못하였으나 농업용저수지 구조물 중의 하나인 사통을 통해 인위적인 하천방류가 가능할 것으로도 판단된다. 무을저수지와 옥성저수지로부터 방류 가능한 하천유지용수량(수질개선용수량)을 변동시켜가며 모의를 수행한 결과 Fig. 5는 연간 유출량 및 수질변화를 Fig. 7은 월별 유출량 및 수질변화에 대한 증감비율을 나타냈다. Fig. 5a에서는 저수지에서 방류량 즉, 하천유지용수공급량이 증가할수록 유출량이 약 1~8% 소폭 증가함을 알 수 있었다. 특히, 비교적 갈수해로 기록되고 있는 2008년과 2009년에는 하천유량의 증가효과가 비교적 크게 나타났다. 본 연구에서는 하류에서의 필요 하천유지용수공급량을 상류 저수지에서 전량 공급하기 보다는 현실적으로 저수량이 사수량에 도달하지 않는 범위 안에서 시나리오를 설정하였다. 이러한 실험적 모의는 실제로 현실에서 실시간 저수지 운영 및 적정 하천유지공급량 산정을 할 수 있도록 하는 의미 있는 결과를 보여줄 수 있다. 특히, 수질의 경우 하천유지용수량이 증가할수록 TN과 TP는 약 2~10%의 수질개선효과를 나타냈다. 이와 같은 수질개선은 용존성 물질의 유송 및 희석효과와 비용존성 물질의 부상 및 침전효과로 설명되어질 수 있으며, 시나리오별 방류량의 증가가 하천의 유송 및 희석효과에 지배적인 영향을 준 것으로 판단된다.

한편, 수자원공사에서는 월단위로 균일하게 공급하는 갈수기 댐 운영 방식에서 방류량을 늘리고 줄이는 방식의 동적변화를 주어 하천 플러싱(flushing) 효과를 유발, 하천환경개선의 효율성을 높여 수질 및 생태서식 환경적 측면에서의 부분적인 개선을 얻고자 한강, 낙동강, 금강 및 섬진강의 4대강 수계 총 9개 다목적댐을 대상으로 증가방류 및 사후 효과평가를 수행한 바 있다. 그 결과 증가방류 전

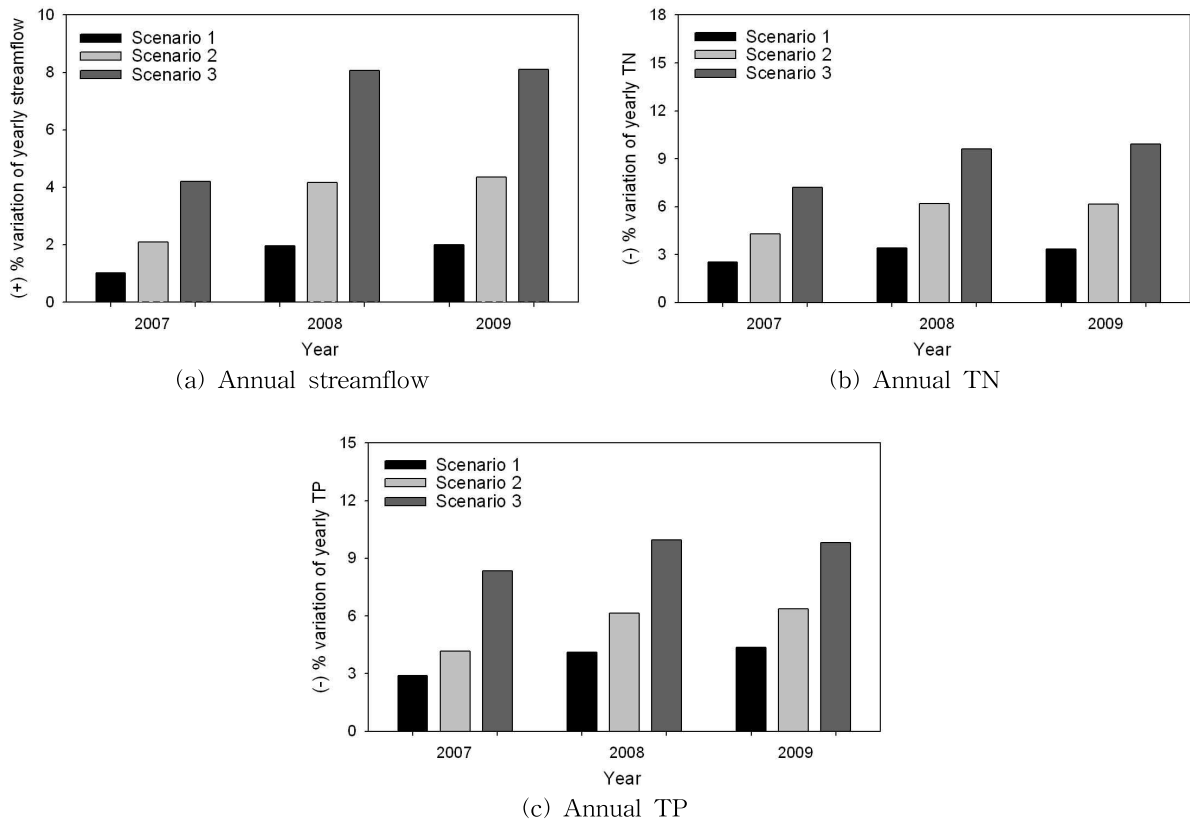


Fig. 5. Annual Variations for each Scenario

대비 방류기간 중·후의 수질농도의 저감이 있었으며 항목별 저감비율은 유기물은 13.8%, 영양물질은 22.8%로 관측되었다(안시권 등, 2008). 이와 같은 실측경향과 본 연구 결과를 비교하였을 경우 모의된 저감효과가 상대적으로 작게 나타났는데, 이는 다목적 댐과 농업용저수지간의 저수용량과 공급여유량에서 상대적으로 많은 차이를 지니고 있기 때문에 두 대상을 직접적으로 비교하기에는 무리가 따른다. 또한 본 연구에서는 수계의 시·공간적 수질변화 분석이 추후에 더욱 보완될 필요가 있다.

Fig. 6a는 유량의 월변동 결과를 보여주고 있다. 모든 월에서 하류 유출량 증가를 볼 수 있으나 시나리오 1에서는 월간 변동특성이 크지 않은 반면에, 시나리오 2와 3에서는 11월에서 3월까지의 하천유량을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이는 하천유량 확보가 절실히 요구되는 갈수기에 수량부족 문제를 해소할 수 있는 대안 중의 하나가 될 수 있을 것이다. Fig. 6b와 Fig. 6c는 각각의 수질항목에 대한 월변동 결과를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 모든 월에서 저수지 직하류에 하천유량증가에 따른 수질개선효과가 나타났으며, 11월에서 3월까지 갈수기시 수질은 비교적 다른 계절에 비하여 크게

개선됨을 알 수 있었다. 특히, 2월에서 4월까지의 방류량에 의한 월유량은 1.0~10.8% 범위의 증가효과, TN과 TP는 각각 3.0~10.6%와 3.4~11.2%의 개선효과를 나타내었고, 이는 적정 하천유지용수 공급량의 선정이 갈수기에 얼마나 하천유량과 수질변화에 물리적으로 영향을 줄 수 있는지를 보여주는 결과이다. 강두기 등(2010)은 옥성저수지의 방류부와 하류부에 대한 수질모니터링 결과를 비교하였는데, 영양물질은 방류부와 하류부가 유사한 수질개선 수준을 나타낸 반면, SS와 BOD는 각각 21%와 38% 수준으로 수질개선효과를 나타내었다. 이러한 농업용저수지 증고를 통한 갈수기 방류량의 변화는 하도의 물리적 특성 및 식생을 변화시키며 미세 부유 및 부착조류 군집 생물량의 변화를 초래하여 수체의 영향상태를 완화시키는 생태학적 오염도 감소효과를 제공할 것으로 판단된다(안시권 등, 2008). 그러나 이와 같은 하류하천환경에 대한 개선효과는 득 높이에 앞서 무엇보다도 농업용저수지의 수질악화를 초래하는 비점오염원을 제어하고 준설 등의 저수지 수질개선사업이 선행되어야만 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

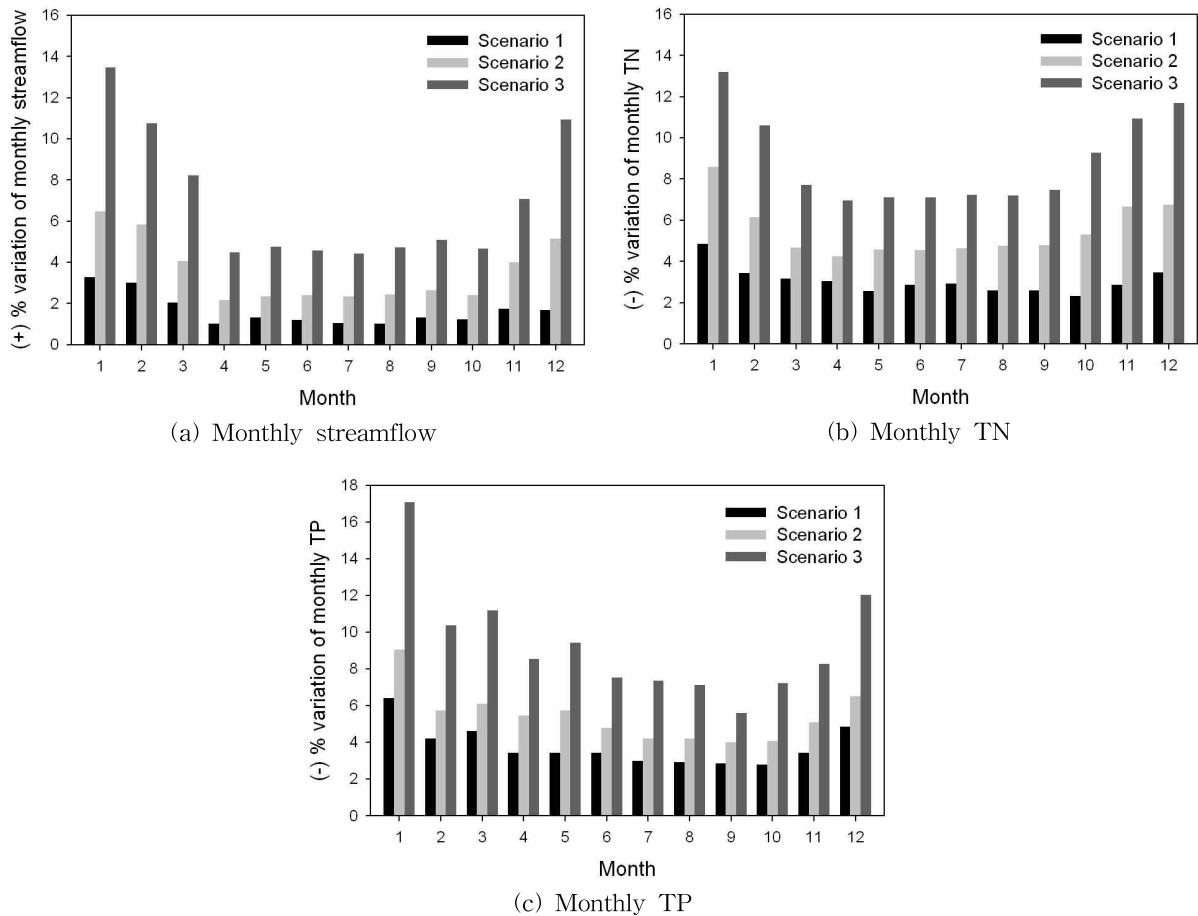


Fig. 6. Monthly Variation for each Scenario

## 5. 결론

유역의 하천유량은 물순환 체계에서 수문학적으로 최 말단에 위치하며 모든 자연적·인위적 영향에 민감하게 반응한다. 본 연구에서는 감천유역을 대상으로 저수지 독높이기 사업으로 인해 확보할 수 있는 추가 저수량을 하천 유지용수로 활용할 경우 하류부 하천의 수문·수질변화를 분석하고자 하였다.

SWAT 모형구축을 위하여 기상, 수문 및 다양한 GIS 분석을 수행하였으며, 유량 및 수질 측정자료를 이용하여 보정을 수행하였다. 구축된 모형을 이용하여 상류 농업용 저수지의 방류로 인한 영향을 분석하기 위한 시나리오는 저수지의 사수량을 고려하여 선정하였으며 하류 하천유지용수 공급량 변동에 초점을 맞추어 적용하였다. 물론, 보다 다양한 저류시설 요소 및 수문 요소 등을 고려할 수 있는 시나리오를 적용할 수 있으나, 본 연구는 농업용 저수지 독높이기 사업에 초점을 맞추어 수행하였다. 각 시

나리오에 따른 하류 하천유량 및 수질의 시간적 변화특성을 분석하였으며, 이를 위해 농업용수 공급 및 저수지와 하천바닥에서의 수리전도도에 의한 저수량 감소는 없는 것으로 가정하였다. 용수 공급량 증가에 따른 하류유량감소 효과 및 저수지, 하천바닥에서의 침투로 인한 저수량 감소효과는 하류유출증가와 상반되는 요소로서 향후 연구에서 이들 요소의 연계에 따른 적합한 저수지 및 유역 관리의 방향에 대하여 다룰 수 있을 것으로 판단된다.

연구결과에 따르면 농업용저수지의 방류량을 증가시킴에 따라 저수지 하류부에서의 하천유량이 증가하였는데, 특히 풍수기보다는 갈수기에 유량증가효과를 뚜렷이 나타내어 방류량에 따른 계절적 변동과 영향이 있음을 확인하였다. 따라서 하천유량 확보가 절실히 요구되는 갈수기 중 현실적으로 2월에서 4월까지 공급할 수 있을 것으로 분석되었으며, 이 시기에 수량부족 문제를 해소할 수 있는 대안 중의 하나가 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 저수지 하류부의 유황 증가에 따라 하천수질이 개선되는

효과를 보였으며, 특히 다른 계절과 비교하여 갈수기에 수질이 크게 개선될 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 결과는 상류유역의 저수지로부터 적정 하천유지용수 공급량의 선정이 하류 갈수기 유행과 수질변화에 얼마나 영향을 줄 수 있는지를 보여주는 결과이며, 4대강 살리기 사업의 일환으로 보건설시 우려되는 유량부족 및 수질문제를 해결하는데 도움을 줄 수 있는 의미 있는 연구사례라고 판단된다.

현재 4대강 살리기 사업은 하천 하상정비 뿐만 아니라 환경기초시설 설치 및 개선 사업, 비점처리시설설치사업, 수생태복원사업 등 수질개선사업도 진행되고 있다. 양적-질적인 면을 모두 고려하여 최상의 하천환경을 유지하려면 우선적으로 농업용저수지 수질개선사업을 통한 양질의 풍부한 수량을 확보하여 깨끗하고 넉넉한 유지용수를 공급하는 것이 필요하며, 특히 낙동강수계와 같이 강우량이 적어 만성적 수질오염과 수량부족에 시달리고 있는 곳에서 확보되는 하천 유지용수를 갈수기에 적절히 방류한다면 건천화된 낙동강 수질개선에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 향후 환경개선 효율을 증대시키기 위한 농업용저수지 운영 방법론을 방류시기, 규모, 기간, 횡수별로 정립하여 하천의 수질 및 생태적 측면에 미치는 영향을 종합적으로 분석하는 추가적인 연구가 필요하며 더불어 강변저류지 설치 확대, 소규모 댐 건설 및 하수재이용안 등은 하천 수량 및 수질개선을 위한 추가적인 대안으로 검토될 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원 녹색성장정책연구의 일환으로 수행된 “기후변화 대응을 위한 수자원 네트워크 구축방안 II(과제번호: 2011-12)”의 연구내용의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

강두기, 김만식, 박재범, 김종성, 갈병석, 신동수 (2010). 중소하천 수리시설물의 운영 및 관리현황, 경제인문사회연구회, 녹색성장정책연구 위탁연구 2010, 환경정책·평가연구원. pp. 135-138.

강형식, 장재호, 안중호, 김익재 (2011). “유역 모형과 하천 모형의 연계를 통한 낙동강 분류 흐름 예측.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제7호, pp. 577-590.

국도해양부, 4대강 살리기 추진본부 (2009). 4대강 살리기 마스터플랜. pp. 87-105.

김남원, 이정은, 이병주 (2007). “한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유행변동 특성 분석 및 평가.” **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제27권, 제1B호, pp. 53-63.

김필식, 김선주 (2006). “소규모 댐의 효과적 운영을 위한 저수관리 기법 개발.” **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제48권, 제2호, pp. 27-35.

농림수산식품부, 한국농어촌공사 (2010). 농업생산기반정비사업 통계연보. pp. 27-371.

농림수산식품부, 한국농어촌공사 (2009). 농업용수 수질측정망 조사 보고서. pp. 135-138.

박정규 (2007). “금강유역의 장기유출해석을 위한 SWAT 모형 적용.” **환경관리학회지**, 환경관리학회, 제13권, 제1호, pp. 41-48.

신현석, 강두기 (2006). “SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 227-240.

안시권, 조영현, 성영두 (2008). “댐 하류하천 환경개선을 위한 다목적댐 증가방류 효과 고찰.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제10호, pp. 41-47.

안중호, 홍용석, 강형식, 김호정, 한 대호, 장재호, 서동일, 박윤희 (2010). 기후변화 대응을 위한 수질 제어 및 관리방안 I. 경제인문사회연구회, 녹색성장종합연구총서, 10-02-97(6), 한국환경정책·평가연구원. pp. 112-116.

이광야, 김해도, 조진훈 (2011). “농업용저수지 운영표준안 개발.” **한국수자원학회 2011년도 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 118.

이용준, 박민지, 박기욱, 김성준 (2008). “농업용 저수지 운영을 고려한 SWAT 모형의 수문학적 거동 분석.” **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제11권, 제1호, pp. 20-30.

이은형, 서동일 (2011). “SWAT-CUP을 이용한 대청호 유역 장기 유출 유량 보정 및 검증.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제9호, pp. 711-720.

최낙원 (2010). 농업용 저수지를 이용한 하천유지용수 확보방안 : 보현댐과 황계저수지 연계를 중심으로. 석사학위논문, 영남대학교. pp. 1-72.

한강수계관리위원회 (2006). 유역내 하천유지 가능 유하량 해석. pp. 21-114.

한국수자원공사 (1997). 댐건설 전후의 자연환경변화에 관한 연구 : 대청댐 유역을 중심으로. pp. 1-242.

환경부 (2008). 2007 상수도통계연보. pp. 308-353.

Arnold, J.G., and Fohrer, N. (2005). "SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling." *Hydrol Process*, Vol. 19, pp. 563-572.

ASCE (1993). "ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models." *Irrigation Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 3, pp. 429-442.

Brown, L.C., and Barnwell, T.O. Jr. (1987). *The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual*. EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, GA. pp. 1-184.

Donigian, Jr., A.S. (2000). *HSPF Training Workshop Handbook and CD*. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22, EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "Riverflow forecasting through conceptual model." *Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, J.R., and Williams, J.R. (2004). *Soil and Water Assessment Tool: The theoretical documentation (Version 2005)*, U.S. Agricultural Research Service. pp. 1-476.

Sharpley, A.N., and Syers, J.K. (1979). "Phosphorus inputs into a stream draining an agricultural watershed: II. Amounts and relative significance of runoff types." *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 11, pp. 417-428.

Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygar, S.R., and Perkins, S.P. (1999). "Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the rattlesnake creek basin in south-central kansas." *Hydrology*, Vol. 214, pp. 179-196.

논문번호: 12-045	접수: 2012.05.01
수정일자: 2012.06.21	심사완료: 2012.06.21