



갈수기 유량 확보에 따른 섬강 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 효과 분석

Analysis of the Effect of Water Quality Improvement on Seomgang and South Han River by Securing the Flow during the Dry Season

이서로^a · 이관재^b · 한정호^c · 이동준^d · 김종건^e · 임경재^{f, †}

Lee, Seoro · Lee, Gwanjae · Han, Jeongho · Lee, Dongjun · Kim, Jonggun · Lim, Kyoung Jae

ABSTRACT

The water pollution Accident in the South Han River is increasing due to increase of pollutants inflow from small streams from rural areas and reduced flow rate. This study predicted the change of water quality in the main stream of the South Han River due to climate change through the linkage of watershed and water quality models. Also, This study analyzed the effect of water quality improvement on Seomgang and the South Han River by securing the flow during the dry season. According to the scenarios for securing the river flow during drought season, the river flow in the Seomgang is increased up to 2.19 times, and the water quality during the drought season was improved up to BOD₅ 20.5%, T-N 40.8%, T-P 53.4%. Also, the water quality of the main stream of the South Han River improved to 5.22% of BOD₅, 5.42% of T-N and 7.69% of T-P as the river flow was secured from the Seomgang. The result of this study confirms that securing the baseflow in the Seomgang according to the scenarios for securing the river flow during the dry season has a positive effect on the improvement of the water quality of the rivers in the main river of the Seomgang and South Han River. The results of this study will contribute to the establishment of reasonable management to improve the water quality of the main stream of the Seomgang and South Han River.

Keywords: Dry season; securing the flow; climate change; water quality

1. 서 론

최근 한강수계 주요 상수원인 팔당호에서는 매년 봄철 지속되는 가뭄으로 인한 유량 감소 및 비점오염원 영향 요인이 증가함에 따라 조류 및 기타 수질오염문제에 대비한 적극적인 수질관리의 필요성이 대두되고 있다(MOE, 2014). 팔당호로는 3개의 하천이 유입되고 있으며, 남한강은 팔당호 수질에 대한 영향도가 상대적으로 높으며, 강수량이 부족한 봄철 시

기에 오염도가 높아 팔당호 수질에 더욱 큰 영향을 미치고 있다(Lee et al., 2007). 특히 최근 도시화 및 기후변화가 진행되면서 남한강 본류에서는 인근 주요 유입하천으로부터의 과다한 영양염류 유입과 봄철 지속되는 가뭄으로 인한 유량부족 등으로 부영양화 문제가 빈번하게 발생하는 실정이다(Lee et al., 2018). 따라서 팔당호 갈수기 수질악화에 대비하여 남한강 본류 갈수기 수질을 효율적으로 개선하기 위한 대책들이 사전에 수립되어야 하며, 이를 바탕으로 남한강 본류 갈수기 수질에 미치는 영향이 규명되어야 할 필요성이 있다. 일반적으로 하천 유량이 부족한 갈수기에 근본적인 하천 수질 개선을 위해서는 유입하천으로부터의 오염물질 유입량을 줄이거나 하천 내 충분한 유량 확보를 통해서 하류 하천의 자정작용을 극대화시켜 수질 개선 효과를 기대할 수 있다(Kim et al., 2008). 또한 하천 내 유량 확보는 수질 개선뿐만 아니라 어류 서식환경과 같은 수생태계에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다(Choi, 2008). 국내에서는 QUAL 계열 하천 수질 모델을 이용하여 유량 확보에 따른 수질 개선 효과를 예측한 연구가 여러 수행되어왔다. Kim et al. (2011)은 영산강을 대상으로 하천 유량 확보를 위해 저수지 증고, 하상여과, 친변저류지 조성, 소규모 댐 건설 등 방법을 선정하고 QUALKO 수질 모델을 이용하여 유량 확보에 따른 영산강 수질 개선 효과를 예측한 바 있으며, Park et al. (2003)은 도심을 관류하는 광주

^a PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^b PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^c PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^d PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^e Postdoctoral Research Fellow, Institute of Agricultural and Life Science, Kangwon National University

^f Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

† **Corresponding author**

Tel.: +82-33-241-6468 Fax.: +82-33-259-5560

E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr

Received: December 20, 2018

Revised: February 7, 2019

Accepted: February 22, 2019

천 본류 구간을 대상으로 QUAL2E 모델을 이용하여 광주천 유입 유량 확보에 따른 수질 개선 효과를 분석한 바 있다. 그러나 수질 모델은 주로 정상 상태에서 모의되기 때문에 강우 발생에 따른 유역에서의 비점오염원이나 수문 사상과 같은 동적 요소를 반영하기에 어려움이 있다(Migliaccio et al., 2007). 게다가 최근 급격한 도시화와 기후변화로 유역에서의 유출특성 및 오염물질 발생 특성이 변화하고 있으며, 강수의 시·공간적 변동성 증가로 한반도에서의 가뭄은 더욱 빈번히 발생하면서 식수난, 농업용수 부족, 하천의 건천화, 수질 악화 및 수생생물 서식지 감소 등 피해를 증가시킬 것으로 전망되고 있다(KEI, 2013; RIG, 2016). 따라서 기후변화에 따른 유역 내 수문 순환 변화와 본류 하천 내 수문 반응 기작 등을 합리적으로 구현하기 위한 유역 및 수질 모델 통합 연계가 필요하며, 이를 통한 남한강 본류 갈수기 장래 수질 변화 예측과 수질 개선 대책 시나리오에 따른 수질 개선 효과 분석이 이루어져야 할 필요성이 있다. 국내에서는 유역 모델과 수질 모델 연계를 통해 강우 발생에 따른 유역 내 비점오염원 발생 거동을 고려하여 하천 수질을 예측하는 연구가 많이 수행되어왔다(Choi et al., 2011; Kang et al., 2013). 그러나 아직까지 충주댐 하류 남한강 본류 하천을 대상으로 유역 및 수질 모델 연계를 통해 기후변화에 따른 장래 갈수기 수질 변화 예측과 양질의 유량 확보가 본류 하천 갈수기 수질에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 미흡한 실정이다. 앞서 언급하였듯이 갈수기 하천 내 유량 확보는 수질 및 수생태계 건강성과 연속성 유지 측면에서 매우 중요하며, 점오염원과 비점오염원을 동시에 고려한 유역 및 수질 통합 연계 모델링은 기후변화에 따른 남한강 본류의 갈수기 수질 변화 예측과 유량 확보 대책에 따른 수질 개선 효과를 합리적으로 분석하는데 있어서 유용하게 활용될 수 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 충주댐 하류 남한강 본류 주요 유입하천과 남한강 본류 하천을 대상으로 유역 및 수질 모델 연계를 통해 극한 가뭄 사상에 따른 남한강 본류의 장래 갈수기 수질 변화를 예측하고, 갈수기 유량 확보 시나리오를 통해 극한 가뭄 사상에서의 섬강 말단 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 효과를 분석하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

남한강은 한강의 발원지로 상류에 충주댐과 하류에 강천보, 여주보, 이포보 3개보를 두고 있으며, 우리나라 최대 상수원인 팔당호로 유입되고 있다. 남한강 본류로 유입되는 주요 하천으로는 섬강, 청미천, 양화천, 북하천이 있으며, 이 중 섬

강 유역은 유역면적이 1,491.0 km², 유역평균경사가 30.4%이며, 임야 비율이 74.1%로 전형적인 산지 유역 특성을 보이고 있다. 섬강 유역 내 유입되는 주요 하천으로는 원주천, 전천, 계천 등이 있으며, 황성댐이 상류에 위치하고 있다. 섬강 유역의 경우 유역 내 도시와 농지, 공장 등 다양한 오염 배출원이 고루 분포하고 있는 원주천과 축산계 오염원이 산재되어 있는 전천 등 섬강 지류 하천에서의 유량 감소와 오염물질 배출량 증가 등 원인으로 섬강 본류 갈수기 수질은 급격히 악화되고 있다. Lee et al. (2018) 연구에 의하면 섬강 유역은 남한강 주요 유입하천 중 남한강 본류 갈수기 수질오염에 가장 큰 영향을 미치는 유역으로 남한강 본류 갈수기 수질악화에 대비하여 점·기저비점을 통합적으로 관리하기 위한 갈수기 유량 확보 등 대책이 중점적으로 강구되어야 할 오염 우심유역으로 선정된 바 있다. 본 연구에서는 한강D 측정망이 위치한 남한강대교 지점에서부터 이포보 하류 6 km 지점까지의 남한강 본류 구간과 섬강 유역을 갈수기 유량 확보 시나리오 적용 대상 유역으로 선정하였다(Fig. 1).

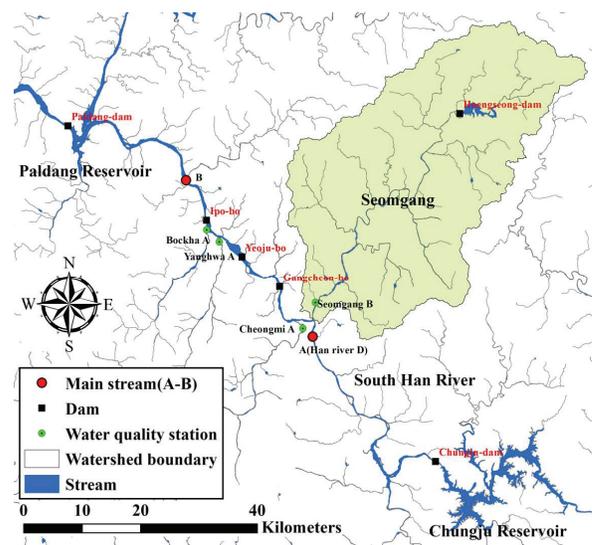


Fig. 1 Study area in this research

2. 모델 개요 및 입력자료 구축

가. SWAT 모델 개요

본 연구에서는 남한강 본류로 유입되는 주요 유입하천을 대상으로 유량 및 수질 모의를 위해 SWAT 모델을 사용하였다. SWAT(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agriculture Research Service, ARS)에서 개발된 유역단위 준분포형 장기 강우-유출 모델로 수문 수질에 대한 일 단위 모의가 가능하며, 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출수 및

농업화학물질의 영향 예측이 가능하다(Arnold et al., 1998). SWAT 모델은 유역을 동일한 토지이용과 토양의 조합인 수문 반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분화하며, 아래 식 (1)과 같은 물수지식에 근거를 두고 지표유출, 기저유출, 침투량, 강수, 증발산량 등을 모의한다. 또한 SWAT 모델은 단일 호우사상에 대한 모의가 가능한 수정범용토양침식모델(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)을 통해 유역에서의 토양유실량을 모의하며, QUAL2E(Brown and Barnwell, 1987) 모델을 통해 하천 내 용해된 영양물질과 유사에 부착된 영양물질을 추적할 수 있다.

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

식 (1)에서 SW_t 는 최종 토양수분량(mm), SW_0 는 i일의 초기 토양수분량(mm), t 는 시간으로서 일단위(day), R_{day} 는 i일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i일의 지표유출량(mm), Ea 는 i일의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i일의 침투량(mm), Q_{gw} 는 i일의 회귀수량(mm)을 의미한다.

나. QUAL-MEV 모델 개요

본 연구에서는 남한강 본류 하천을 대상으로 하천 수질 모의를 하기 위해 국립환경과학원에서 QUAL2E 모델을 기반으로 개발된 QUAL-MEV 모델을 사용하였다. QUAL-MEV 모델은 대상 하천을 n개의 대구간(reach)으로 나누고, 각 대구간을 소구간 요소(element)로 다시 나누어 소구간별 농도를 계산하는 방법을 이용하고 있으며, 하천의 흐름선을 축으로 중심과 수평 방향으로 완전혼합을 가정하고 있다. 또한 이 모델은 수중에서의 물질 이송과정으로 이류와 확산을 고려하며, 1차원 흐름방향에 대해 일어나는 것을 가정하고 있다. 이 모

델을 통해서 사용자는 용존산소, 생물화학적 산소요구량, 수온, 질소, 인 등 여러 가지 항목을 사용자 선택에 따라 모의할 수 있으며, 오염부하, 지류 유입, 용수와 취수, 유출 등 다양한 유입 및 방류조건을 고려한 하천 수질변화를 모의할 수 있다(NIER, 2013). 또한 QUAL-MEV 모델은 기존 QUAL2E 모델에서 고려하지 못하였던 조류의 생산 및 사멸에 따른 내부 유기물 증가를 고려하고 아래 식 (2)와 같이 Bottle BOD₅ 개념이 도입되어 있어 보다 정확한 국내 하천 수질 예측이 가능하다.

$$\frac{dL}{dt} = -K_1L - \frac{K_3}{d}L + ADBOD - BODDN + \sigma_{BOD}/d \quad (2)$$

여기서, L 은 생분해성 유기물 농도 지표(mg/L), K_1 은 탈산소계수(1/day), K_3 은 침강에 의한 CBOD 변화율(ft/day), $ADBOD$ 는 조류 사멸에 의해 증가되는 생분해 유기물량(mg/day), $BODDN$ 는 탈질과정에 의한 유기물 분해량(mg/day), σ_{BOD} 는 바닥으로부터의 BOD 재부유율(mg/ft²/day), d 는 평균 수심(ft)을 의미한다.

다. 유역 및 수질 모델 입력자료 구축

본 연구에서는 섬강 유역을 갈수기 유량 확보 시나리오 적용 대상 유역으로 선정하였지만, 남한강 본류로 유입되는 주요 하천에 대한 기후변화 시나리오의 영향을 남한강 본류 하천 내 동일하게 고려하고자 4개 하천(섬강, 청미천, 양화천, 복하천)을 대상으로 SWAT 모델 입력 자료(지형, 토지이용도, 토양도, 기상자료)를 구축하였다. 지형자료의 경우 국토교통부 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도(1:5,000)로부터 격자크기 30m DEM(Digital Elevation Model, DEM)을 제작하여 구축하였다. 토지이용도 및 토양도 자료의 경우 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 중분류 토지이용도(1:25,000)

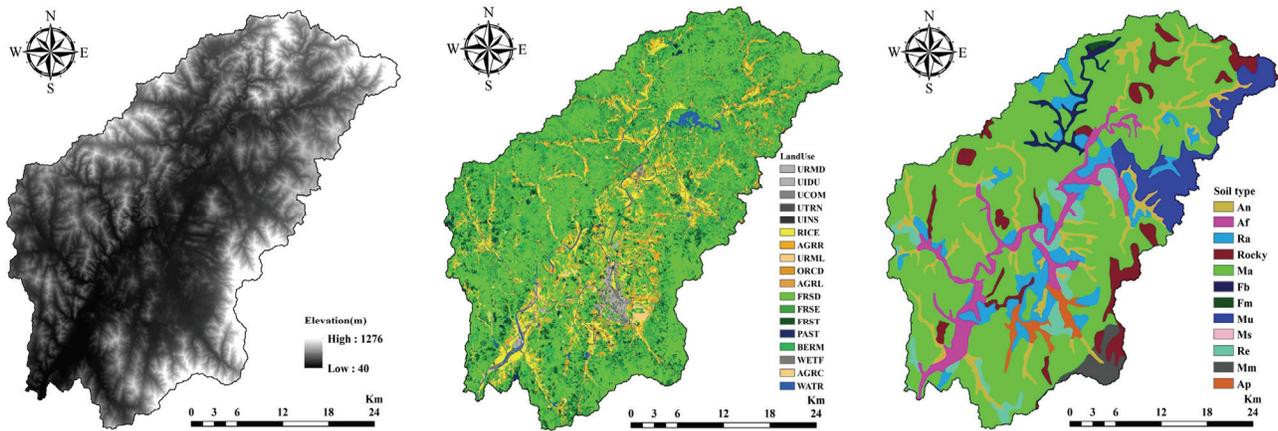


Fig. 2 Construction of SWAT input data of Seomgang(DEM, Landuse, Soil)

자료와 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공하는 개략도양도(1:50,000) 자료를 통해 구축하였다. 기상자료의 경우 SWAT 모델 안정화 기간을 고려하여 8개년도(2011-2018)의 일 강수량(mm), 기온(°C), 태양복사량(MJ/m²), 풍속(m/sec), 상대습도(%) 자료를 기상청으로부터 제공받아 구축하였다. 섬강 유역 내 상류에 위치한 횡성댐의 방류량 자료의 경우 한국수자원공사의 댐 별 제원과 8개년도(2011-2018)의 일 방류량을 수집하여 구축하였으며, 관측 일 유량방법(observed daily outflow method)으로 SWAT 모델에 적용하였다. Fig. 2는 섬강 유역에 대해 구축한 SWAT 모델 입력자료 DEM, 토지이용도, 토양도를 보여주고 있다. 또한 본 연구에서는 QUAL-MEV 모델의 입력 자료를 구축하기 위해 우선적으로 남한강 본류 하천을 대상으로 수리학적 및 지형적인 특성을 고려하여 11개의 대구간과 0.5 km 간격의 83개 소구간으로 구분하였으며, 2017년 남한강 하류 중권역 물환경관리계획을 참고하여 본류 하천 내 위치한 양수장, 취수장, 하수종말처리장, 유입하천 등 자료를 점오염원 입력 자료로 고려하였다 (Fig. 3).

3. 유역 및 수질 모델 적용성 평가

SWAT 모델은 QUAL2E 모형을 기반으로 하천 수질을 모의하며, 수질 항목 중 BOD는 CBOD 형태로 모의된다. 그러나 현재 우리나라에서는 총량관리대상물질인 BOD가 수질오염 공정시험법에 따라 Bottle BOD₅ 형태로 측정되고 있으며, 이를 통해 하천 수질 관리계획이 수립되고 있다. 이에 본 연구에서는 CBOD 항목이 아래 식 (3)과 같이 조류의 호흡 및 산화성 질소에 의한 BOD를 고려하여 Bottle BOD₅ 형태로 모의될 수 있도록 SWAT 모델 내 소스코드를 수정하여 이용하였다. 아래 식 (3)에서 knb는 20°C에서의 질산화 비율 계수, ai4는 조류 호흡 단위 당 산소 섭취율, rhoq는 20°C에서의 조류 호흡률, algcon은 초기 조류 농도를 의미한다.

$$Bottle\ BOD_5 = CBOD_5 + 4.57 \times (NH_3) \times (1 - e^{-5knb}) + ai_4 \times algcon \times (1 - e^{-5rhoq}) \quad (3)$$

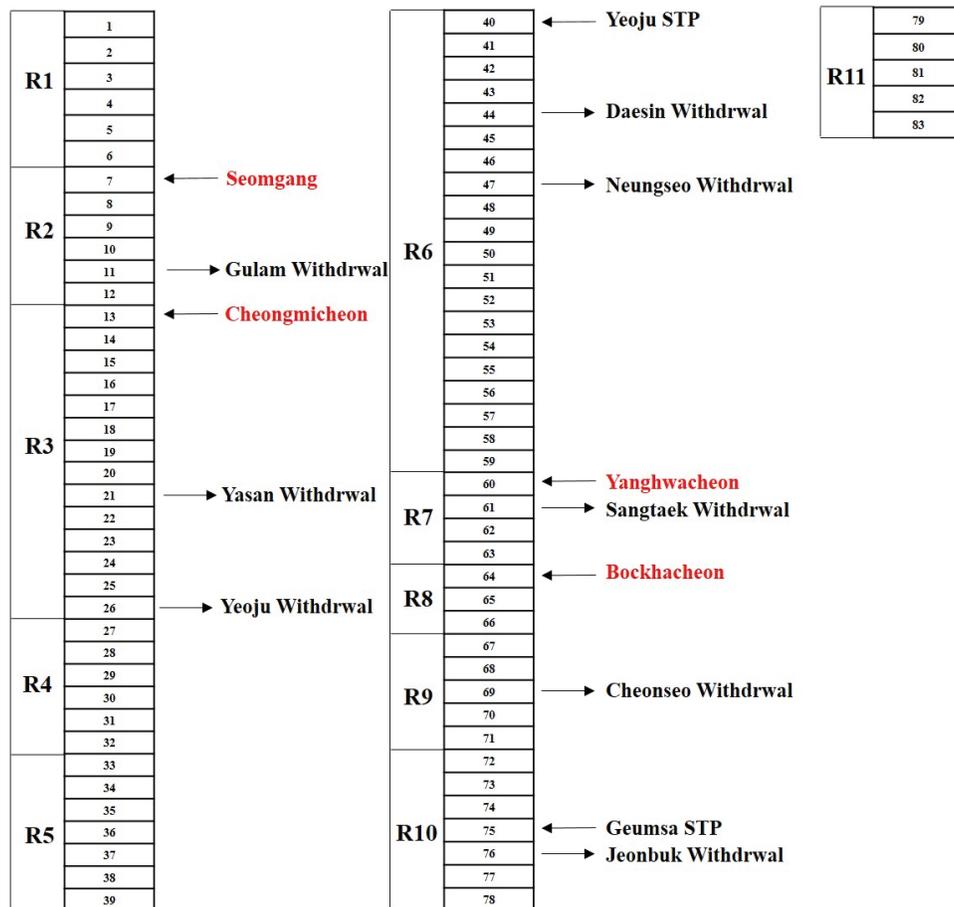


Fig. 3 Stream network of reaches and computational element(South Han River)

Table 1 Acceptable ranges and fitted value of the SWAT model parameters

Parameter	Variation method	Manual range	Calibrated value			
			S,G	C,C	Y,C	B,C
Hydrology(Flow)						
ALPHA_BF	Replace by value	0~1	0.83	0.86	0.65	0.99
GWQMN	Replace by value	0~5000	4887.50	4187.00	2500.00	1500.00
GW_DELAY	Replace by value	0~500	388.75	10.00	50.00	107.64
RCHRG_DP	Replace by value	0~1	0.09	0.01	0.05	0.05
REVAPMN	Replace by value	0~500	10.00	30.00	750.00	275.80
GW_REVAP	Replace by value	0.02~0.2	0.20	0.08	0.05	0.16
CH_K2	Replace by value	-0.01~150	261.25	195.75	100.00	303.72
SURLAG	Replace by value	0.05~24	12.56	4.00	4.00	4.00
SOL_AWC	Multiply by value	0~1	0.98	0.12~0.5	0.85	0.12~0.5
CN2	Multiply by value	25~98	1.12	1.05	1.20	1.15
SOL_K	Multiply by value	0~2000	1.01	5~100	1.07	5~100
CANMX	Replace by value	0~100	0.00	20.87	17.00	0.00
ESCO	Replace by value	0.01~1.0	0.33	0.69	0.67	0.49
SLSOIL	Replace by value	0~150	30.00	6.70	138.71	81.41
EPCO	Replace by value	0~1	0.20	1.00	1.00	1.00
LAT_TTIME	Replace by value	0~180	70.00	7.00	0.00	2.75
Nutrients(BOD ₅ , T-N, T-P)						
RK1	Replace by value	0.02~3.4	3.20	1.25	3.25	1.36
RK3	Replace by value	-0.36~0.36	0.34	0.28	0.30	-0.21
SOL_CBN	Replace by value	0.05~10	0.05	0.07	0.05	0.22
RHOQ	Replace by value	0.05~0.5	0.05	2.50	0.42	0.08
AI4	Replace by value	1.6~2.3	1.60	2.30	1.60	1.32
ERORGN	Replace by value	0~5	1.50	0.00	0.00	0.00
LAT_ORGN	Replace by value	0~200	4.00	1.80	5.00	11.00
RS3	Replace by value	0.001~1.0	0.05	0.16	0.17	0.80
RS4	Replace by value	0.001~0.1	0.003	0.02	0.01	0.01
P_UPDIS	Replace by value	0~100	0.28	25.75	1.17	20.00
PHOSKD	Replace by value	100~200	60.00	180.25	173.89	175
PPERCO	Replace by value	10~17.5	16.39	11.59	15.39	13.70
ERORGP	Replace by value	0~5	0.02	1.14	3.20	2.02
SOL_ORGP	Replace by value	0~100	70.00	93.60	95.00	0.00
BC4	Replace by value	0.01~0.7	0.01	0.08	0.35	0.40
RS2	Replace by value	0.001~0.1	0.01	0.10	0.04	0.05
RS5	Replace by value	0.001~0.1	0.10	0.02	0.02	0.05
SOL_LABP	Replace by value	0~100	6.20	5.00	5.00	5.00
GWSOLP	Replace by value	0~1000	1.00	0.20	0.00	0.00
LAT_ORGP	Replace by value	0~200	0.00	0.50	0.15	1.00

S,G: Seomgang, C,C: Cheongmicheon, Y,C: Yanghwacheon, B,C: Bockhacheon

Table 2 Acceptable ranges and input value of the QUAL-MEV model parameters

Parameter		Unit	Range	Input value
K_1	Carbonaceous deoxygeneration rate constant	1/day	0.02~3.40	0.02~0.056
K_3	Rate of loss of BOD due to settling	1/day	-0.36~0.36	0.01
β_1	Rate constant for the biological oxidation of NH_3 to NO_2	1/day	0.1~1.0	0.05
β_2	Rate constant for the biological oxidation of NO_2 to NO_3	1/day	0.2~2.0	1.0
β_3	Rate constant for the hydrolysis of org-N of NH_3	1/day	0.02~0.40	0.10
β_4	Rate constant for the decay of org-P to dis-P	1/day	0.01~0.70	0.10
σ_2	Benthos source rate for dis-P	mg(P)/ft ² day	Variable	-95.0~95.0
σ_3	Benthos source rate for NH_3	mg(O)/ft ² day	Variable	0~6,200.0
σ_4	Org-N settling rate	1/day	0.001~0.100	0.010
σ_5	Org-P settling rate	1/day	0.001~0.100	0.100

Table 3 Efficient model range and confidence interval(Donigian, 2000)

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very Good
NSE (Flow)	<0.6%	0.6~0.7%	0.7~0.8	>0.8%
% difference (Water flow)	-	15~25%	10~15%	<10%
% difference (Nutrients)	-	25~35%	15~25%	<15%

이를 통해 본 연구에서는 남한강 주요 유입하천을 대상으로 SWAT 모델을 통해 2014년부터 2017년까지 유량 및 수질을 일단위로 모의하였으며, 환경부 8일 총량측정망 자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 섬강 경우 본 연구에서의 실측 모니터링 기간을 고려하여 2014년부터 2018년 7월까지의 유량 및 수질 자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 유량 및 수질에 대한 보정은 5개의 알고리즘(SUFI-2, PARASOL, MCMC, PSO, GLUE)을 이용하여 자동적으로 매개변수 보정이 가능한 SWAT-CUP 통해 수행하였다(Abbaspour, 2007). 유입하천별 유량 및 수질 보정 항목은 기존의 여러 연구들에서 사용된 주요 매개변수 중심으로 선정하였으며, 매개변수의 보정 범위와 최종 입력 값을 Table 1에 나타내었다. SWAT 모델에 대한 적용성을 평가하기 위한 통계적 변량으로는 모델 효율성계수(Nash and Sutcliffe efficiency, *NSE*)와 결정계수(Coefficient of determination, R^2)를 이용하였으며, 갈수기 기간에 대해서는 %difference(ASCE, 1993)를 이용하였다. 유입하천별 갈수기 기간 자료는 Lee et al. (2018)이 제시한 남한강 주요 유입하천별 갈수기 기준 유량(섬강 6.33 m³/sec, 청미천 1.85 m³/sec, 양화천 0.96 m³/sec, 복하천 1.98 m³/sec)을 통해 도출하였다. R^2 와 *NSE*는 1에 근접할수록 모델의 모의값이 실측값을 잘 반영하는 것을 의미하며, %difference는 0에 가까울수록 실측값과 모의값의 차이가 작다는 것을 의미한다. 또한 본 연구에서는 QUAL-MEV 모델을 통해 남한강 본류 하천 수질을 모의하였으며, 본류 구간 내 위치해 있는 일반측정망

지점의 월평균(12월-5월) 수질 값과 모델로부터 모의된 일반측정망 지점에서의 수질 값이 근접할 수 있도록 보정을 실시하였다. 본류 구간 내 유입하천에 대한 유량 및 수질 입력 경계 자료는 SWAT 모델 모의값에 대한 불확실성을 최소화하기 위해 유입하천별 말단에 위치한 총량측정망 자료를 이용하였다. QUAL-MEV 모델에 대한 적용성 평가는 *NSE*와 R^2 그리고 %difference를 이용하였으며, 시계열 분석이 아닌 상대오차가 최소화되도록 단순 시행착오법을 통해 수질 매개변수 보정을 실시하였다. 남한강 본류에 대한 수질 보정은 모델 manual에 제시된 주요 수질 매개변수 중심으로 수행하였으며, 주요 매개변수의 보정 범위와 최종 입력 값을 Table 2에 나타내었다. Table 3은 Donigian (2000)이 제시한 일반적인 모델 효율성의 범위와 신뢰 구간을 나타낸다.

4. 기후변화 시나리오를 통한 극한 가뭄사상 선정

최근 급격한 기후변화로 인해 다양한 사회적·환경적·경제적 문제가 빈번히 발생하면서 기후변화에 따른 수자원의 영향을 파악하기 위해 기후변화 시나리오를 활용한 모델링 연구가 많이 수행되고 있다. 전 지구 기후변화 시나리오 산출을 위한 국제사업인 CMIP5(the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project 5)는 IPCC 제5차 평가보고서에서 사용한 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오 자료를 제공하고 있다. 최근에는 미래 기후변

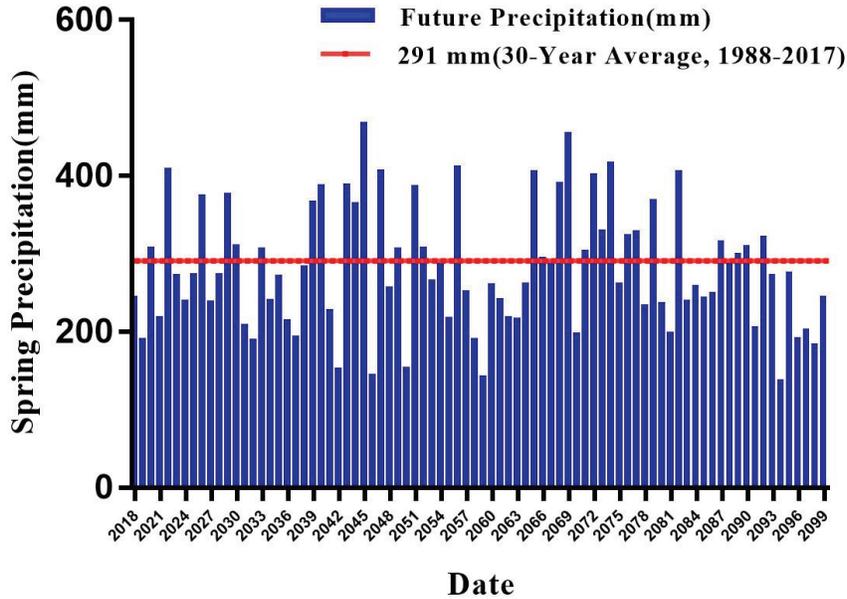


Fig. 4 Selection of extreme drought events through future climate scenarios

화 시나리오 자료의 불확실성을 고려하기 위해 다양한 기후 변화 모델(Global Climate Model, GCM)들로부터 제공된 기후 정보를 활용한 다중모델앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 기법이 활용되고 있다(Chung et al., 2015). APEC 기후변화 센터(APEC Climate Center, APCC)의 연구에 따르면 다양한 기후변화 모델을 활용한 모델링 과정을 통해 생성된 시나리오의 특성을 분석한 결과 INM-CM4 모델을 통해 생성된 시나리오의 강수량이 가장 적게 나타나는 것으로 분석된 바 있다(APCC, 2013) 극한 가뭄 사상을 합리적으로 선정하기에 앞서 우선적으로 강수량 이외에 연속 무강우 및 강우 기간 등 시간적 강우패턴과 같은 주요 요소를 고려한 기후변화 모델 선정 및 평가가 이루어져야 하지만 본 연구에서는 강우가 가장 적게 발생하는 시기를 극한 가뭄 발생 시기로 가정하고 향후 극한 가뭄 사상에서 상류 하천에서의 갈수기 유량 확보가 섬강 말단 및 남한강 본류 갈수기 수질에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 초점을 두고 연구를 진행하였다. 이에 본 연구에서는 APEC 기후변화 센터에서 생성한 INM-CM4 모델의 RCP 4.5를 기준으로 대상 유역 지배 관측소(이천, 원주)의 연도별(2018-2099) 봄철(3월~5월) 강수량 분석을 통해 극한 가뭄 사상(2046년)을 선정하였다(Fig. 4).

5. 미래 기후변화 변화를 고려한 댐 방류량 자료 구축

상류 하천에서의 댐 운영은 하류 하천의 유량 및 수질에 큰 영향을 미치며, 미래 기후변화에 따라 댐 운영 방법 및 방류량은 변동될 수 있다. 따라서 SWAT 모델을 통해 기후변화

에 따른 유량 및 수질 변화를 예측하기 위해서는 기후변화에 따라 변화되는 댐 방류량 또한 고려해야 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 섬강 유역 내 상류에 위치해 있는 횡성댐과 남한강 상류에 위치해 있는 충주댐을 대상으로 월 유입량 및 방류량 자료를 이용하여 회귀식을 도출하였다(Fig. 5). 회귀식 도출에 사용된 유입량 및 방류량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 횡성댐 18년(2000-2017)치, 충주댐 32년(1986-2017)치 관측 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 섬강 유역을 대상으로 SWAT 모델 내 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 횡성댐 유입량 자료를 구축하였다. 구축된 미래 횡성댐 유입량 자료는 미래 횡성댐 방류량 자료를 구축하기 위한 횡성댐 방류량 회귀식(Fig. 5(a))에 적용되었으며, 최종적으로 구축된 미래 횡성댐 방류량 자료는 SWAT 모델에 적용되었다. 또한 본 연구에서는 2016년 국토교통부 물관리연구사업의 기후변화 대비 수자원 적응기술 개발 연구에서 도출된 연구 자료를 활용하여 충주댐의 미래 충주댐 갈수기 평균 유입량(68.2 m³/sec)을 산정하고, 이를 충주댐 방류량 회귀식(Fig. 5(b))에 적용하여 미래 충주댐 갈수기 평균 방류량(95.1 m³/sec)을 산정하였다. 그러나 본 연구에서 QUAL-MEV 모델 모의를 위해 구축한 남한강 본류 구간의 유입 지점은 충주댐 하류 남한강대교에 위치한 한강D 측정망으로 충주댐 방류 지점에서 약 22 km 하류에 위치하고 있다(Fig. 1). 따라서 본 연구에서는 과거 2008년부터 2017년 동안의 충주댐 월별 방류량 관측 자료와 한강D 측정망의 월별 유출량 자료를 이용하여 회귀식(Fig. 5(c))을 도출하였다. 최종적으로 본 연구에서는 앞서 산정된 미래 충주댐 갈수기 평균

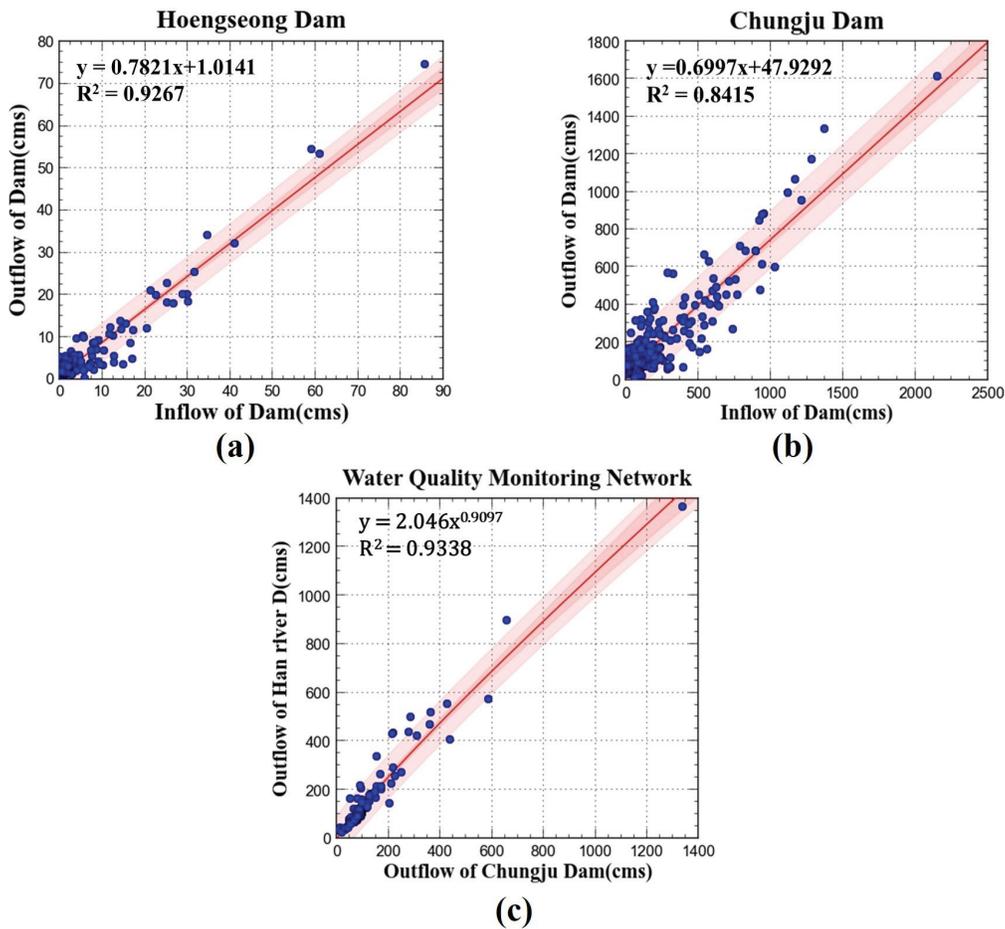


Fig. 5 Derivation of regression formula based on monthly inflow and outflow of dam

방류량을 충주댐 방류량 및 한강D 측정망의 유출량 회귀식 (Fig. 5(c))에 적용하여 한강D 측정망에서의 미래 갈수기 유출량(129.0 m³/sec)을 산정하고 QUAL-MEV 모델 모의를 위한 남한강 본류 유입지점의 유입량 입력 경계 자료로 사용하였다.

6. 갈수기 유량 확보 시나리오 설정

우리나라에서 산림은 국토의 65%를 차지하고 있으며, 여름철 홍수조절기능 뿐만 아니라 봄·가을철 갈수완화 기능이 있어 수자원을 안정적으로 이용하는데 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다(Kim et al., 2004). 이러한 산림의 중요성에 따라 국내에서는 대표적 산림정책으로 어린나무 가꾸기, 가지치기, 숲야베기(간벌) 등 단계적인 숲 가꾸기 사업이 꾸준히 이루어지고 있다. 지속적인 숲 가꾸기 사업을 통해서는 목재 생산성 증대, 생물다양성 증가, 산사태 방지 등 효과뿐만 아니라 수자원 측면에서 산림의 수원함양 기능을 증진시켜 갈수기 유량 확보 및 하천 수질정화 등 긍정적인 효과를 기대할 수 있다(Kang et al., 2018). 기존 국내·외 여러 연구에서는

간벌 사업에 따른 유량 확보의 가능성이 파악된 바 있다. 국외 연구에서는 간벌을 통해 최소 10%에서 71%까지 유량 확보가 가능할 수 있다는 것이 제시된 바 있으며(Lesch and Scott, 1997; Webb and Kathuria, 2012). 국내 연구 결과에서도 간벌 후 강수량에 대한 갈수기 유량의 증가율이 간벌 전보다 약 2.3배 이상 증가된 바 있다(KFRI, 2002). 섬강 유역의 경우 전체 유역 면적의 74.1%가 임야비율로 전형적인 산지 유역 특성을 보이며, 최근 극심한 가뭄시기였던 2015년에 섬강 유역의 평균 강수량(821.9 mm)이 2012년 대비 506.3 mm (38.1%)로 감소함에 따라 섬강 말단(섬강 B 측정망)에서의 하천 유량은 약 77.8%정도 감소된 바 있다(WREO, 2017). 이에

Table 4 Scenarios for securing the flow during the dry season

Scenario	Scenario number	Description
Thinning	Scenario 1	Adjusted evapotranspiration 95%
	Scenario 2	Adjusted evapotranspiration 90%
	Scenario 3	Adjusted evapotranspiration 85%

본 연구에서는 섬강 유역 내 갈수기 유량 확보 방안으로 산림 간벌을 선정하였으며, Table 4와 같이 산림 내 증발산량 조정에 따른 침투량 및 기저유량의 변화를 간벌에 따른 영향으로 가정하였다. 또한 본 연구에서는 SWAT 모델을 통한 간벌 시나리오 적용 및 평가를 위해 소유역 내 산림 Hru 증발산량 값에 침투량 비율(1-조정된 증발산량 비율)을 곱해주어 계산된 값은 토양으로 침투되어 기저유량과 함께 고려될 수 있도록 SWAT 모델 내 증발산 및 침투량 산정 소스코드를 수정하여 이용하였다. 최종적으로 본 연구에서는 섬강 유역 내 상류에 위치한 소권역 중 산림 비율이 높은 소권역(횡성담하류, 금계천) 내 산림을 대상으로 간벌 시나리오 적용을 통해 섬강 말단에서의 갈수기 유량 확보 가능성을 파악하고 갈수기 유량 확보에 따른 섬강 말단 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 효과를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유역 및 수질 모형 적용성 평가 결과

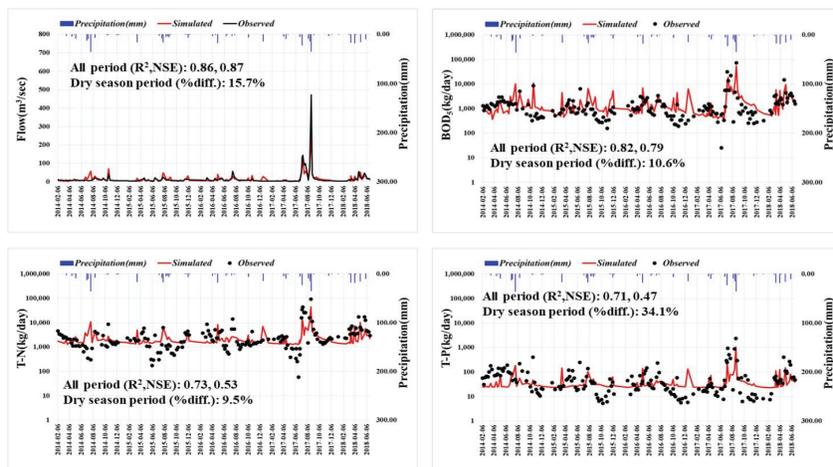
남한강 주요 유입하천별 SWAT 모델로부터 일단위로 모의

된 유량 및 수질 값을 보정한 결과, Fig. 6과 같이 전체 유황기 간에서 유량에 대한 R^2 , NSE는 0.86~0.90, 0.73~0.88, BOD_5 에 대한 R^2 , NSE는 0.63~0.84, 0.46~0.79, T-N에 대한 R^2 , NSE는 0.52~0.75, 0.48~0.53, T-P에 대한 R^2 , NSE는 0.68~0.76, 0.47~0.65 범위로 R^2 와 NSE가 각각 0.4 이상으로 분석되었다. Ramanarayanan et al. (1997)연구에 의하면 R^2 와 NSE가 각각 0.5, 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 명시한 바 있다. 유입하천별 갈수기 구간에 대한 유량 및 수질 보정 결과, 수질항목별 %difference는 Donigian (2000)이 제시한 모델 효율 범위와 신뢰 구간 기준에 따라 전반적으로 “Good”(15~25%) 수준 이상으로 SWAT 모델이 유입하천별 갈수기 유량 및 수질 특성을 적절히 잘 반영하고 있는 것으로 분석되었으며, 섬강의 T-P 항목에 대한 %difference는 “fair”(<25%)로 저유량 부분에서의 모의값이 실측값에 비해 다소 높게 산정되는 경향으로 나타났다(Table 5). 또한 QUAL-MEV 모델을 통해 모의된 남한강 본류 하천 내 위치해 있는 일반측정망 지점에서의 수질을 보정한 결과, 모든 수질 항목별 R^2 와 NSE는 0.9 이상으로 분석되었으며, %difference의 경우 “Very good”(<15%) 수준으로 모의값이 실측값의 오

Table 5 The result of evaluation of applicability of SWAT model

Stream	Flow			BOD_5			T-N			T-P		
	R^2	NSE	% diff. (Dry season)	R^2	NSE	% diff. (Dry season)	R^2	NSE	% diff. (Dry season)	R^2	NSE	% diff. (Dry season)
S.G.	0.86	0.77	15.7	0.82	0.79	10.6	0.73	0.53	9.5	0.71	0.47	34.1
C.C.	0.88	0.88	10.0	0.84	0.46	3.0	0.75	0.50	21.8	0.76	0.61	19.0
Y.C.	0.89	0.73	0.8	0.63	0.62	23.0	0.52	0.52	22.0	0.68	0.65	16.0
B.C.	0.90	0.84	5.0	0.71	0.71	3.9	0.72	0.48	14.0	0.68	0.51	13.0

S.G.: Seomgang, C.C.: Cheongmicheon, Y.C.: Yanghwacheon, B.C.: Bockhacheon



(a) Seomgang

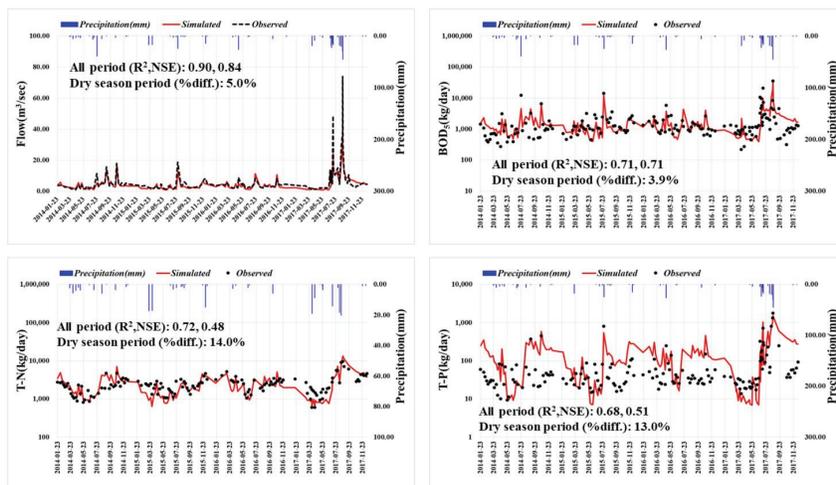
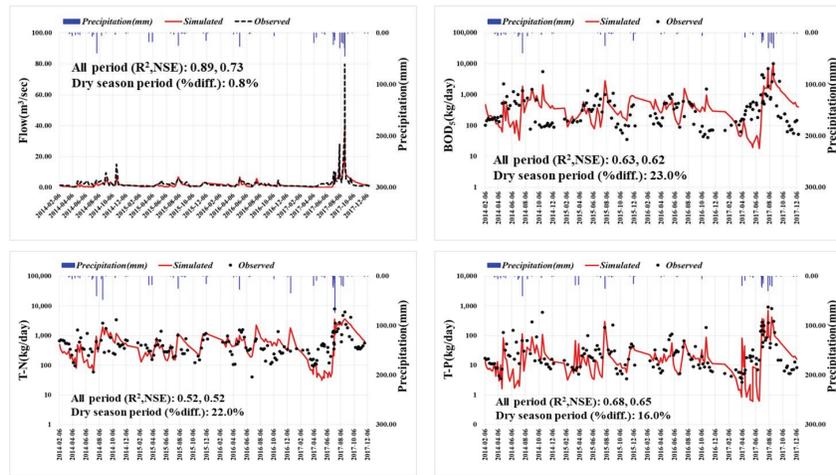
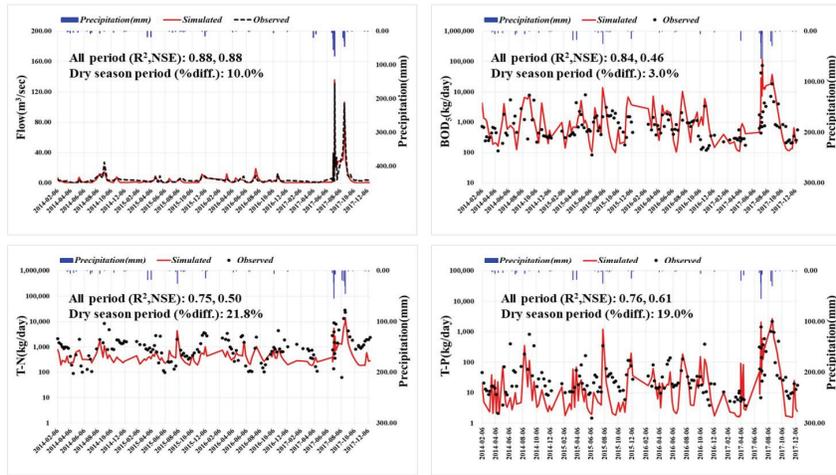


Fig. 6 The result of flow and water quality calibration

차 범위 5% 이내에 포함되는 것으로 나타났다(Fig. 7). 수질 항목별 남한강 본류 갈수기 수질 평균 농도는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 각 유입하천 구간에서 높아지는 경향으로 나타났는데 이는 다양한 오염원이 산재되어 있는 유입하천으로부터 배출되는 오염물질과 본류 구간 내 위치해있는 하수종말처리장 방류수의 영향으로 판단되며, 체류시간이 증가하는 본류 구간에서 내부생성 유기물이 증가하였기 때문이라 판단된다. 특히 복하천이 유입되는 지점에서 모든 수질 평균 농도가 급

격히 높아지는 것으로 나타났는데 이는 복하천 중·하류에 위치한 대규모 하·폐수처리시설에서 배출되는 방류량의 영향으로 판단된다.

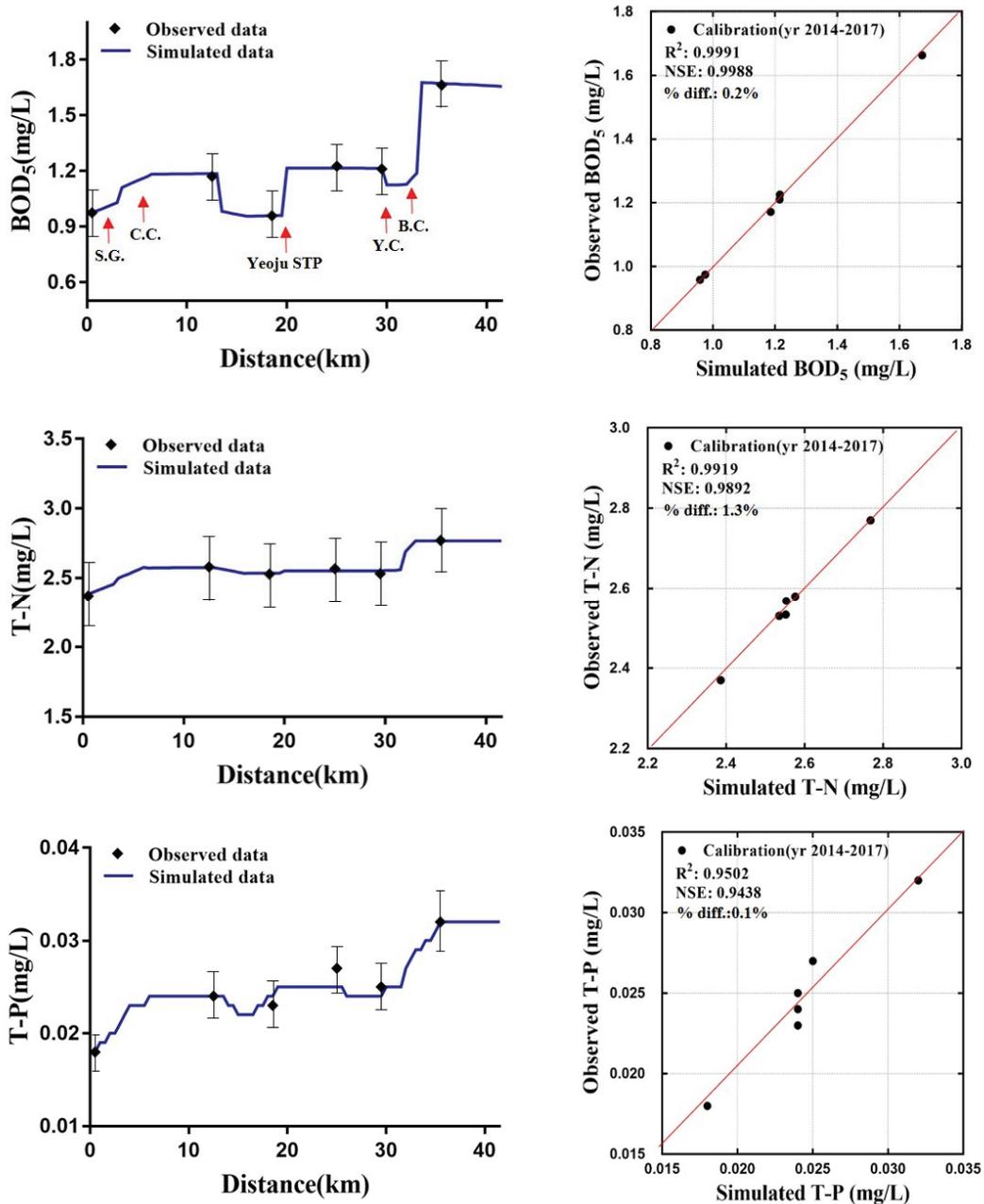


Fig. 7 The result of water quality calibration in the main stream of the South Han river

2. 극한 가뭄 사상에서의 남한강 본류 갈수기 수질 변화 예측

본 연구에서는 남한강 주요 유입하천을 대상으로 SWAT 모델을 통해 극한 가뭄사상에서의 유량 및 수질을 모의하였다. 모의 결과, 남한강 주요 유입하천별 극한 가뭄 사상에서의 갈수기 평균 유량은 섬강 5.04 m³/sec, 청미천 0.90 m³/sec, 양화천 0.44 m³/sec, 복하천 1.61 m³/sec로 과거 갈수기 기준 유량에 비해 최소 19%에서 최대 54%까지 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, 본 연구에서는 SWAT 모델로부터 모의된 유입하천별 극한 가뭄 사상에서의 유량 및 수질 자료를 QUAL-MEV 모델의 입력 경계 자료로 사용하여 남한강 본류 갈수기 수질 변화를 분석하였다. 분석 결과, 극한 가뭄 사상에서의 남한강 본류 갈수기 평균 수질 농도는 과거에 비해 각각 BOD₅ 1.050배, T-N 1.001배, T-P 1.221배 증가하는 것으로 예측되었다(Fig. 8). 이는 극심한 가뭄이 발생하였을 경우 남한강 주요 유입하천의 유량 감소와 오염물질 농도 증가는 남한강 본류 하천 갈수기 수질을 악화시킬 것을 시사하며, 향후 기후변화에 따른 남한강 본류 갈수기 수질 악화에 대비하여 남한강 주요 유입하천 내 총인 고도처리시설 설치, 공공하수처리시설 확충, 가축분뇨공동자원화, 갈수기 유량 확보 방안 등과 같은 대책이 필요할 것으로 판단된다.

3. 갈수기 유량 확보에 따른 섬강 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 효과 분석 결과

본 연구에서는 섬강 유역을 대상으로 SWAT 모델 내 간벌 시나리오 적용을 통해 극한 가뭄 사상에서의 섬강 유역의 갈수기 유량 확보 가능성을 파악하고 유량 확보에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다. 또한 QUAL-MEV 모델을 통해 섬강 유역에서 확보된 갈수기 하천 유량이 남한강 본류 갈수기 수질 개선에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, SWAT 모델 내 간벌 시나리오 적용에 따른 섬강 유역의 갈수기 평균 유량은 기존 갈수기 평균 유량에 비해 최대 2.19배(Scenario 3) 증가하는 것으로 나타났다. 이는 간벌에 따라 산림에서의 차단손실량이 감소함으로써 지표 및 지하에 도달하는 강수량이 증가하여 하천 내 갈수기 하천 유량이 확보된 것으로 판단된다(Kim et al., 2004). 특히 Scenario 2, 3을 적용하였을 때의 섬강 유역의 갈수기 평균 유량은 각각 Lee et al. (2018)이 제시한 섬강 갈수기 기준 유량(6.33 m³/sec)과 섬강 저수기 기준 유량(10.33 m³/sec)을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 간벌 시나리오별 섬강 유역의 갈수기 평균 수질 농도는 유량 증가에 따른 오염물질 희석 작용으로 최대 BOD₅ 20.5%, T-N 40.8%, T-P 53.4%까지 개선되는 것으로 나타났다(Fig. 9). 특히 T-N과 T-P의 수질 개선 효과는 BOD₅ 수질 개선 효과에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 강우의 영향이 적은 건기 시 대부분 오염물질은 하수처리장 방류수

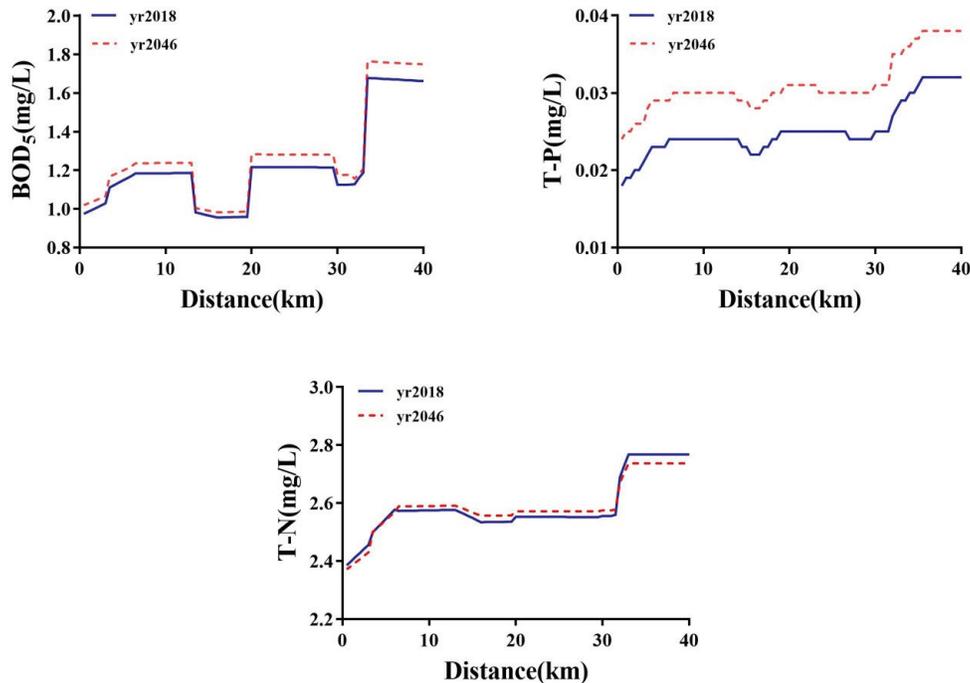


Fig. 8 Analysis of water quality change in the main stream of the South Han River during extreme drought

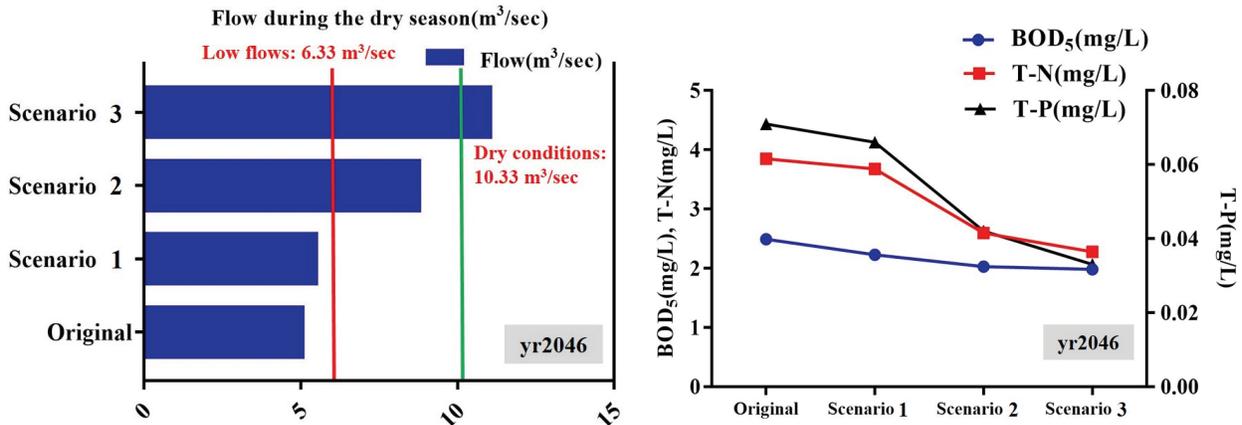


Fig. 9 Variation of flow and water quality according to scenarios for securing the flow during dry season

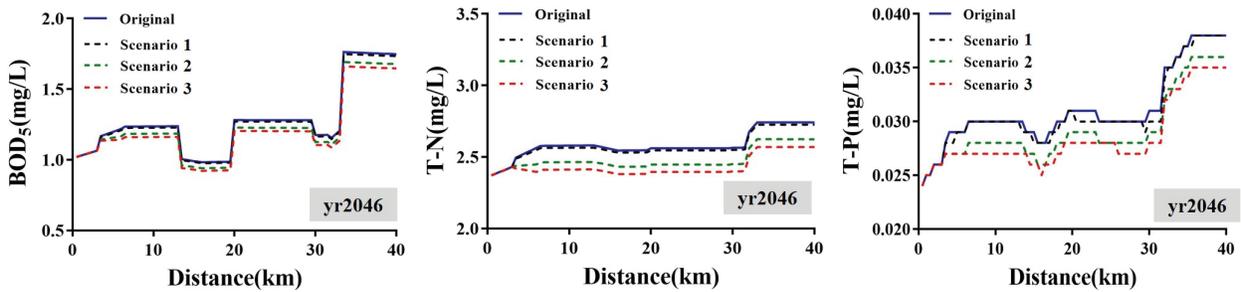


Fig. 10 The application result of scenario for securing the flow (South Han River)

와 같은 점오염원과 기저유출에 의해 유입되는 특성을 가지고 있기 때문에 산림 간벌에 따라 기저 유량이 증가함으로써 기저 비점오염에 상대적으로 큰 영향을 미치는 T-N, T-P 항목에 대한 수질 희석 효과가 BOD₅ 수질에 비해 상대적으로 높게 작용하였기 때문이라 판단된다(Choi et al., 2015). 또한 상류에 위치한 섬강 유역에서의 갈수기 유량 확보에 따라 남한강 본류 갈수기 수질 평균 농도는 최대 BOD₅ 5.22%, T-N 5.42%, T-P 7.69%까지 개선되는 것으로 나타났다(Fig. 10).

IV. 결 론

본 연구에서는 충주댐 하류 남한강 본류 주요 유입하천과 남한강 본류 하천을 대상으로 유역 및 수질 모델 연계를 통해 극한 가뭄 사상에서의 남한강 본류 갈수기 수질 변화를 예측하고 섬강 유역 내 갈수기 유량 확보 시나리오에 따른 섬강 말단 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 효과를 분석하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 유역 및 수질 모델의 적용성을 검증하였으며, INM-CM4 모델을 통해 생성된 기후변화 시나리오를 기준으로 섬강 유역 내 기상 지배 관측소의 봄철 강수량을 분석한 결과, 2046년 해에 극심한 가뭄이 발생하는

것으로 분석되었다. 유역 모델 내 기후변화 시나리오 적용에 따라 극한 가뭄 사상에서의 남한강 주요 유입하천별 갈수기 평균 유량은 과거 갈수기 기준 유량에 비해 최소 19%에서 최대 54%까지 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 섬강 유역 내 갈수기 하천 유량이 감소함에 따라 남한강 본류 내 갈수기 평균 수질 농도는 과거에 비해 각각 BOD₅ 1.050배, T-N 1.001배, T-P 1.221배 증가하는 것으로 예측되었다. 이에 본 연구에서는 섬강 말단 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 대책으로 간벌에 따른 증발산량 저감 및 침투량 증진 시나리오를 구축 후 모델링을 통해 갈수기 유량 확보에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다. 분석 결과, 간벌 시나리오에 따라 섬강 유역에서의 갈수기 평균 유량은 최대 2.19배까지 증가하는 것으로 분석되었다. 갈수기 수질 평균 농도는 최대 BOD₅ 20.5%, T-N 40.8%, T-P 53.4%까지 개선되는 것으로 나타났으며, 이는 갈수기 유량 확보에 따른 오염물질 희석 작용에 기인한 것으로 판단된다. 또한 상류에 위치한 섬강 유역에서의 갈수기 유량 확보에 따라 남한강 본류 갈수기 수질 평균 농도는 최대 BOD₅ 5.22%, T-N 5.42%, T-P 7.69%까지 개선되는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과를 통해서 산림 간벌에 따른 기저유량의 확보가 갈수기 하천 수량 및 수질에 긍정적인 영향을 미치는 것을 간접적으로 확인할 수 있었으며, 이는 수량·수질뿐

만 아니라 수생태계 건강성·연속성 유지 측면에서 큰 기여를 할 수 있을 것이라 판단된다. 그러나 무분별한 산림 간벌은 자연 생태계 파괴의 주요 원인이 될 수 있으며, 대기정화, 토사유출 방지, 휴양 기능 등 다양한 공익적 기능에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 섬강 유역 내 갈수기 유량 확보 방안으로 적절 수준의 산림 간벌 대책이 강구되어야 할 것이며, 이를 위해서는 간벌에 대한 지속적이고 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 산림 간벌 이외에 갈수기 유량 확보를 위한 빗물 이용, 공공하수처리시설 방류수 재이용, 우수의 저류 및 침투시설 확충 등 다양한 대책이 검토되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 미래 강수 전망에 대한 불확실성이 상대적으로 큰 특정 기후변화 모델을 통해 극한 가뭄 사상을 선정하였지만, 향후 장래 가뭄에 따른 유량 및 수질 변화 예측 결과를 객관적으로 도출하기 위해서는 다중 기후모델 기반의 앙상블 기법 등을 통한 합리적인 기후변화 시나리오 선정이 무엇보다 중요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 극한 가뭄으로 인한 갈수기 수질악화에 대비하여 섬강 및 남한강 본류의 근본적인 갈수기 수질을 효율적이고 합리적으로 개선하기 위한 대책 수립 마련에 활용이 될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-520160353)와 한강수계관리위원회의 환경기초조사사업(충주댐 하류 남한강 유입하천에 대한 갈수기 수질오염특성 및 오염저감방안 연구)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

1. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89. doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
2. Abbaspour, K. C., 2007. User Manual for SWAT-CUP. Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology; Eawag, Deubendorf, Switzerland, 1-33.
3. ASCE, 1993. ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrig. Drain Eng.* 119(3): 429-442. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(429).
4. APEC Climate Center (APCC), 2013. Analysis of CMIP5 data in water resources considering uncertainty, 21-34 (in Korean).
5. Brown, L. C., and T. O. Barnwell, 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. EPA/600/3-87/007, USEPA.
6. 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.
7. Choi, Y. H., D. H. Kum, J. C. Ryu, Y. H. Jung, Y. S. Kim, J. H. Jeon, K. S. Kim, and K. J. Kim, 2015. A study of total nitrogen pollutant load through baseflow analysis at the watershed. *J. Korean Soc. Water Environ.* 31(1): 55-66 (in Korean). doi:10.15681/KSWE.2015.31.1.55.
8. Choi, H. G., D. I. Kim, J. E. Kim, and K. Y. Han, 2011. Non-point source impact analysis through linkage watershed model and river water quality model. *Journal of Environmental Impact Assessment* 20(1): 25-36 (in Korean).
9. Chung, U. R., J. P. Cho, and E. J. Lee, 2015. Evaluation of Agro-Climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17(2): 108-125 (in Korean). doi:10.5532/KJAFM.2015.17.2.108.
10. 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, Presented and Prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., USA.
11. Kim, Y. K., G. W. Choi, M. S. Ham, and N. W. Kim, 2008. The analysis of potential discharge by dam in Han River basin at dry season. *Journal of Korean Society Water Resources Association* 41(11): 1143-1152 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2008.41.11.1143.
12. Kim, S. G., and G. S. Cha, 2011. Effect of water quality improvement with secure instream flow in Yeongsan River. *Journal of Green Industrial Research, Honam Univ.* 17(2): 45-51 (in Korean).
13. Kang, J. Y., Y. D. Kim, and B. S. Kang, 2013. Effect of change in hydrological environment by climate change on river water quality in Nam River watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(8): 873-884 (in Korean).

14. Kang, R. Y., and S. H. Hong, 2018. The Effect on the forest temperature by reduced biomass caused by natural forest thinning. *Korean Journal of Environment and Ecology* 32(3): 303-312 (in Korean). doi:10.13047/KJEE.2018.32.3.303.
15. Korea Forest Research Institute (KFRI), 2002. Forest watershed monitoring book (Water cycle survey of forest watershed), 22-25 (in Korean).
16. Korea Environment Institute (KEI), 2013. A study of climate change adaptation policies for different types of droughts (in Korean).
17. Kim, K. H., Y. H. Jeong, C. G. Jeong, J. H. Jun, and J. Y. Yoo, 2004. Effects of thinning and pruning on canopy storage capacity, net rainfall and interception loss in *Pinus koraiensis* and *Abies holophylla* plots. *Journal of Korean For. Soc.* 92(3): 276-283 (in Korean).
18. Lee, H. J., D. S. Kong, S. H. Kim, K. S. Shin, J. H. Park, B. I. Kim, S. M. Kim, S. H. Jang, and S. U. Cheon, 2007. investigation on water quality variation characteristics during the season in Namhan River drainage basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(6): 889-896 (in Korean).
19. Lee, S. R., J. Y. Shin, G. J. Lee, Y. S. Sung, K. S. Kim, K. J. Lim, and J. G. Kim, 2018. Analysis of water pollutant load characteristics and its contributions during dry season: focusing on major streams inflow into South-Han river of Chungju-dam downstream. *Korean Society of Environmental Engineers* 40(6): 247-257 (in Korean). doi:10.4491/KSEE.2018.40.6.247.
20. Lesch, W., and S. F. David, 1997. The response in water yield to the thinning of *Pinus radiata*, *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management* 99(3): 295-307. doi:10.1016/S0378-1127(97)000450-5.
21. Migliaccio, K. W., I. Chaubey, and B. E. Haggard, 2007. Evaluation of landscape and instream modeling to predict watershed nutrient yields. *Environmental Modelling & Software* 22: 987-999. doi:10.1016/j.envsoft.2006.06.010.
22. Ministry of Environment, Preemptive response to water quality changes in Paldang Lake. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=343170&menuId=286>. Accessed 13 Mar. 2014.
23. National Institute of Environmental Research (NIER), 2013. A study of water quality model optimization with an application of TMDL reflected on the change of stream environment (in Korean).
24. Park, S. C., J. W. Lee, G. W. Choi, J. M. Oh, and Y. G. Kim, 2003. Effect of water quality improvement with secure instream flow in Urban stream. *The Conference of Korean Society of civil Engineers* 2448-2452 (in Korean).
25. Research Institute For Gangwon (RIG), 2016. Water resource management and drought control by Gangwon province in response to climate change (in Korean).
26. Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W. A. Dugas, L. M. Hauck, and A. M. S. McFarland, 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management, Minneapolis, MN. Paper No. 97-2209.
27. Wonju Regional Environmental Office (WREO), 2017. Water environmental management plans for the middle network of the Seom-river (in Korean).
28. Webb, A. A., and A. Kathuria, 2012. Response of streamflow to afforestation and thinning at Red Hill, Murray Darling Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 412-413: 133-140. doi:10.1016/j.hydro.2011.05.033.