



원주천 수질개선 방안 및 개선효과 평가

An Analysis of the Water Quality Improvement Measures and Evaluation of Wonju Stream

금동혁^a · 신민환^b · 유나영^c · 이서로^d · 김동진^e · 성윤수^f · 이상수^{g,†}

Kum, Donghyuk · Shin, Minhwan · Yu, Nayeong · Lee, Seolo · Kim, Dongjin · Sung, Younsoo · Lee, Sang Soo

ABSTRACT

Recently, the deterioration of water quality in Wonju stream has been reported due to the increase in diverse pollution sources along with community development and urbanization. Various types of attempts with a huge budget were made for better water quality so far, but its effectiveness is still doubted. In order to establish site-oriented measures for water quality improvement, the topographic and hydrologic factors were evaluated based on site inspection and survey. As the major streams merged into the Wonju stream, the Hwa and Heungyang streams were found to have higher pollution loads and contributions compared to other streams due to the scattered livestock farms and industries, and vulnerable land use. Notably, the discharge water from the Wonju Public Sewage Treatment Plant had the highest level of pollution load, impacting on the water quality of Wonju Stream. According to the SWAT model as water quality measures, the improvement effect of water quality in this treatment plant can be reached to the reductions in BOD 11.06%, T-N 23.56%, T-P 10.60% when the proper managements applied, whereas the improvement of water quality would be 3.89%, 1.23%, and 3.32% for BOD, T-N, T-P, respectively, for the industries. The reduction of the livestock industry was generally very high as a pollution source, but it was not much higher at the end of Wonju Stream than other measures. These results recommended that the water quality improvement measures should be designated for each upper-middle-lower section in Wonju stream.

Keywords: Water quality management; sewage treatment plant; SWAT; industry; livestock

1. 서론

우리나라는 여름철 집중호우 시 유역 내 산재해 있던 다량의 오염물질이 일시에 하천으로 유입되고 수리구조물에 의해 오염물질이 장기적으로 정체되면서 발생하는 2차 수질오염이 지속적으로 보고된 바 있다 (Jang et al., 2015; Jang and Yoon, 2017). 특히, 한강은 수도권 주민의 상수원으로 안정적인 수질 관리가 매우 중요하며, 정부는 다목적댐 건설 및 상수

도 시설 개선 등을 통해 수질오염총량제, 하수처리장 방류수 수질기준 강화 등 효율적인 수자원 관리를 위한 예산 투입, 정책 개발 및 관리계획 수립에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 다양한 수질규제 시행과 예산 투자에도 불구하고 수질은 크게 개선되지 않았다 (Kim, 2020). 한강의 수질보전 및 관리를 위해서는 상류 유역의 점오염원과 비점오염원의 배출 관리를 통한 하천의 수질관리가 매우 중요할 것이다. 한강상류 유역은 대부분 산림과 농업지역이지만 강원도 원주천 유역은 혁신도시와 기업도시를 모두 유치한 국내 유일의 주요한 거점으로, 섬강 중권역 전체 인구 증가분의 약 88.3%를 차지하고 있으며, 가장 높은 물 사용량 (69.4%)이 보고된 바 있다 (Lim, 2018). 특히 인구증가와 도시규모 확장에 따른 오염원의 지속적 증가로 원주천뿐만 아니라 향후 전체 한강 수질에 큰 영향을 미칠 수 있는 우심유역이다.

원주천은 수질 개선을 위해 다양한 대책이 제안되었다. 원주시를 관통하는 원주천은 유역 내 다양한 오염원이 분포하고 있는데, 2001년 ‘원주시 환경보전 종합계획’ 보고서에 따르면 원주천은 상류지역 축산폐수, 중류지역 생활오수, 하류지역 용량초과로 비정상 처리돼 방류되는 하수종말처리장의 방류수가 주된 하천 수질 오염의 원인으로 이에 따른 수질개선 방안을 제시하였다. 또한 2008년 원주지방환경청에서도 원주천의 오염도 증가 원인과 대책을 상류, 중류, 하류로 구분

^a Director, EM Research Institute

^b Director, EM Research Institute

^c Team Leader, EM Research Institute

^d Ph.D. Candidate, Department of Agriculture and Biological Engineering, Kangwon National University

^e Section Chief, Total Maximum Daily Load Management Division, Wonju Regional Environment Office

^f Researcher, Total Maximum Daily Load Management Division, Wonju Regional Environment Office

^g Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Yonsei University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-760-2457, Fax: +82-33-760-2571

E-mail: cons@yonsei.ac.kr

Received: September 24, 2020

Revised: November 10, 2020

Accepted: November 10, 2020

하여 제안하였다. 하지만 2005~2007년 수질측정 분석 결과에 따르면 BOD 8.9 mg/L, COD 9.2 mg/L, SS (Suspended Solid) 8.2 mg/L 및 T-P 0.601 mg/L로, 원주시 내 하천수 조사 지점 평균 수질인 BOD 2.0 mg/L, COD 3.2 mg/L, SS 5.0 mg/L 및 T-P 0.102 mg/L를 크게 상회하는 것으로 나타났다 (ME, 2008). 또한 2014년 “원주시 수질오염총량제 대비 오염원조사 및 관리체계 구축 연구”에서 제시된 2011~2013년 수질측정 분석 결과는 원주시 하천수 조사지점의 평균 수질에 비해 BOD는 2.9배, COD는 1.5배, T-P는 3.8배 높은 것으로 나타나 다른 하천에 비해 수질오염이 매우 심각한 것으로 보고되었다. 그리고 2015년부터 2018년까지 환경부 일반측정망 원주천2 (원주천 하류)지점의 연평균 BOD 농도는 4.3 mg/L, T-N 은 7.845 mg/L, T-P는 0.199 mg/L로 조사되어 BOD항목은 중 권역 물환경관리계획 목표수질인 3 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다.

과거 원주천 유역은 주요 현황과 오염원 분석을 통해 다양한 개선 방안이 제안되어 왔으나, 수질 개선 효과는 나타나지 않고 있다. 이에 따라 한강 유역의 지속가능한 수질 관리를 위해서는 상류에 위치한 원주천 유역의 오염원 관리 및 대책

수립이 매우 중요하지만, 과거 오염원 관리 및 대책 수립을 위한 조사는 원주천 유역과 같이 급변화하는 현장의 상황을 정밀하게 반영하기 어려운 한계가 있다. 현재의 원주천 유역 현황을 파악하고, 이에 따른 맞춤형 수질개선대책 수립이 향후 한강유역의 수질 관리를 위해 매우 중요한 시점이라고 판단된다.

따라서, 본 연구의 목적은 원주천의 수질관리를 위해 현장 조사 기반의 오염 원인분석 및 오염원별 수질 관리대책을 도출하고 관리대책에 따른 수질개선효과를 평가하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

섬강은 남한강 상류 수계의 지류로서 충주댐 하류에 위치해 있으며, 남한강 본류를 거쳐 수도권 주민의 취수원인 팔당호로 유입되는 하천에 해당된다. 섬강 유역 내 유입되는 주요 지류로는 원주천, 전천, 계천 등이 있으며, 이 중 원주천은 흥양천, 화천, 신촌천 등과 합쳐져 섬강으로 유입된다 (Fig. 1).

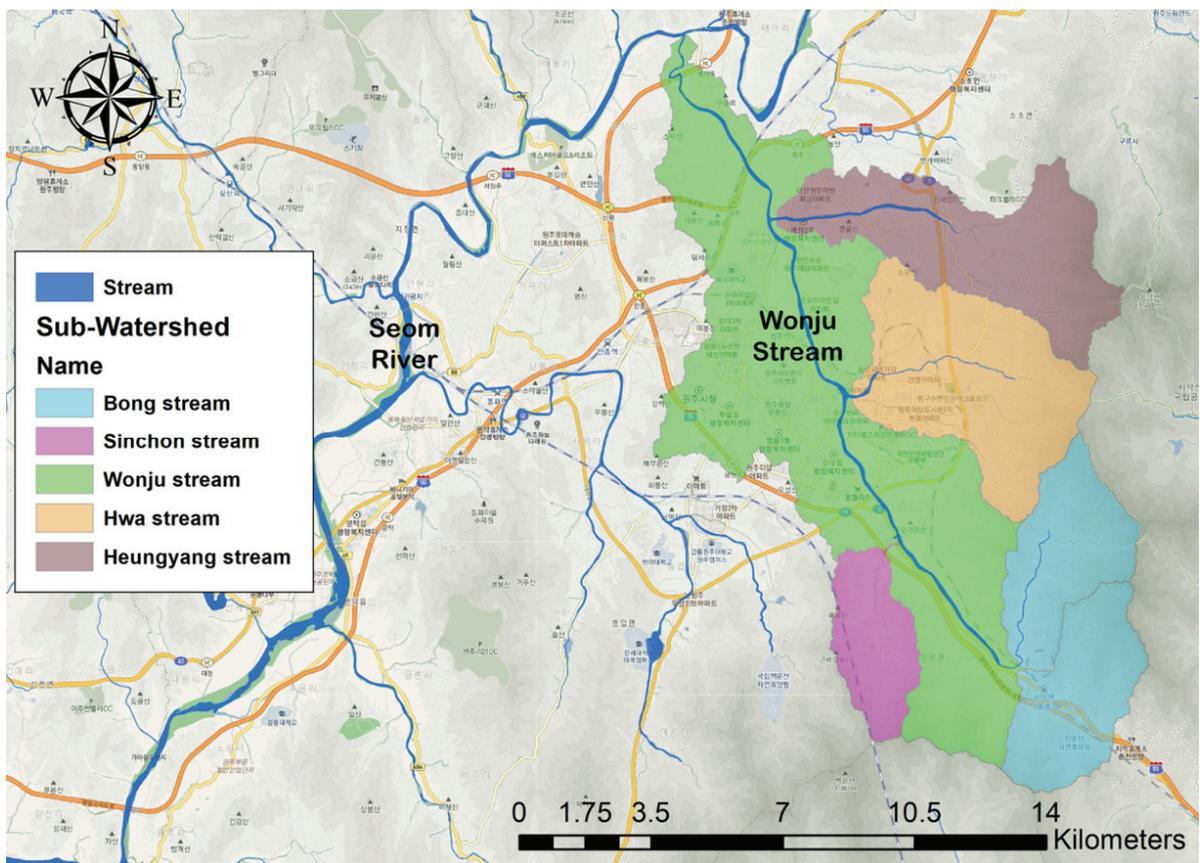


Fig. 1 Map of Wonju Stream area

Table 1 Landuse distribution of each watersheds

Landuse (km ²)		Wonju stream	Heungyang stream	Hwa stream	Bong stream	Sinchon stream
Agricultural land	Paddy	2.77	0.88	1.24	0.00	0.01
	Upland	5.93	1.93	2.85	0.08	0.18
Barren		2.71	0.79	0.67	0.17	0.05
Forest		31.24	15.64	14.68	24.28	7.32
Grass		9.78	1.79	2.89	0.45	0.72
Commercial & residential		17.36	1.60	2.06	0.27	0.09
Water		0.53	0.06	0.07	0.02	0.00
Wet land		0.81	0.15	0.23	0.08	0.05
Area sum		71.14	22.83	24.68	25.53	8.54

유역면적과 유로연장은 각각 152.71 km² 및 22.70 km으로, 원주시 18개 동과 소초면, 판부면, 호저면 등 3개면 5개리에 걸쳐있다. 환경부 환경공간정보시스템에서 제공하는 2019년 세분류 토지피복도를 활용하여 원주천의 유역의 토지이용을 분석한 결과 산림지역 61%, 시가화 건조지역 14% 및 농업지역 10.6%로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 원주천 소유역 내 시가화 건조지역은 농업지역에 비해 2배 이상의 면적을 차지하고 있으며, 반대로 화천, 봉천1 및 신촌천 소유역은 시가화 건조지역에 비해 농업지역이 넓게 분포하고 있다 (Table 1). 원주천유역의 기상특성은 최근 3년 평균 (2016~2018년) 강수량은 1,113 mm로 과거 29 (1987~2015년) 평균 강수량 (1,377 mm) 대비 19.2% (265 mm) 감소하였고, 평균 기온은 1.051배 상승하였다. 하지만 2014년을 기점으로 연강수량은 점차 증가하고 있으며, 일강수량 30 mm 이상의 강수발생도 점차 증가하는 경향을 보이고 있어 향후 원주천 유역에 강우에 의한 비점오염원의 하천 유입 증가가 우려되며, 이는 하천 수질에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2. 오염원 및 하천 현황 현장조사

가. 오염원 현황 조사

원주천 유역 내 오염원의 분포와 규모, 특성을 파악하기 위해 2017년 전국오염원조사자료를 활용하여 환경기초시설 및 오염원 (생활계, 축산계, 산업계, 토지계 등)을 조사하였다. 조사된 자료를 통해 유입하천별 BOD, T-N 및 T-P 등을 포함한 배출부하량을 오염총량관리기술지침 (NIER, 2019)에 따라 오염원별로 산정하고, 원주천 본류에 대한 오염기여도를 분석하였다. 특히, 축산계와 산업계는 변동성이 크기 때문에 오염원 현황을 정밀하게 파악하기 위하여 현장조사를 실시하였다. 현장조사는 유입하천별 배출부하를 토대로 축산계와 산업계 오염우심 소유역을 선정하고, 해당 소유역을 대상으로 축산계는 축종, 사육두수, 분뇨처리 방법, 보관 및 유실방지를 위한 비가림시설과 방지턱 유무를 조사하였으며, 산업계는

업소의 운영여부 및 폐수방류량을 조사하였다.

나. 유입하천별 유량 및 수질 조사

원주천의 오염실태를 분석하기 위해 원주천 유역 말단의 주산교 (WJS1)를 대상으로 2018년 2월부터 매월 정기적으로 유량 및 수질을 조사하였으며, 2018년 6월부터 2019년 5월까지의 주요 유입하천인 홍양천 (HYS), 화천 (HS), 신촌천 (SCS)의 말단 및 오염이 의심되는 유입하천인 단계천 (DGS), 입춘내천 (ICNS), 봉천 (BS)과 하수처리장 방류구 (WJS2), 홍양천 합류후 (WJS3), 홍양천 합류전 (WJS4), 개봉교 (WJS5), 대평교 (WJS6) 등 원주천 우심 구간을 대상으로 추가적으로 유량 및 수질 모니터링을 수행하였다 (Fig. 2, Table 2). 하천

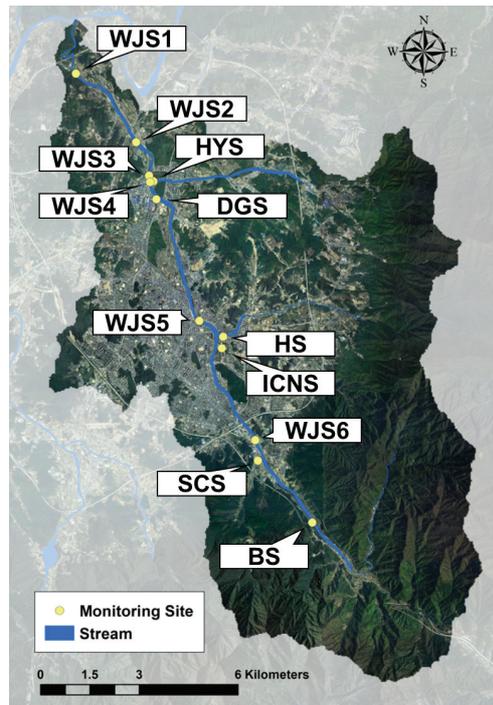


Fig. 2 Monitoring sites in Wonju area

Table 2 Abbreviations and addresses for monitoring sites

Site name	Stream name	Site address
WJS1	Wonju stream	1382-3, Jusan-ri, Hojeo-myeon
WJS2	Wonju stream	382-9, Gahyeon-dong
WJS3	Wonju stream	491, Usan-dong
WJS4	Wonju stream	428-31, Usan-dong
WJS5	Wonju stream	1147-3, Bongsan-dong
WJS6	Wonju stream	1304-3, Gwanseol-dong
HYS	Heungyang stream	2683, Taejang-dong
DGS	Dangye stream	793-3, Usan-dong
HS	Hwa stream	1455-61, Bangok-dong
ICNS	lbchunnae stream	1796, Bangok-dong
SCS	Sinchon stream	1327, Chiak-ro
BS	Bong stream	5, Yeongwonsanseong-gil, Panbu-myeon

유량 측정은 하천유량-유속 면적법을 이용하였으며, 유속과 수심은 물의 흐름과 직각이 되도록 하여 측정하고 하천 폭은 로프 또는 줄자를 이용하여 등간격으로 측정하였다. 채수 시료는 수질오염공정시험법을 준용하여 분석하였다. 원주천 본류 및 유입하천을 대상으로 분석된 유량 및 수질 농도 자료를 이용하여 주요 수질항목별 (BOD, T-N, T-P) 오염부하와 원주천 본류에 대한 유입하천별 오염기여도를 분석하였다. 또한, 산정된 오염부하량을 통해 원주천 유역 내 오염우심구간을 파악하였다.

3. 유입하천별 문제점 분석 및 수질개선대책 수립

원주천 유역의 수질관리대책 수립을 위해 축산계 및 산업계에 대한 현장 조사 결과와 유입하천별 유량 및 수질농도 결과를 이용하여 오염원별/유입하천별 문제점을 도출하였다. 현장 조사를 통해 축산계의 규모와 농가의 비가림시설 및 방지턱 유무 등 축산활동에 따른 보관·관리 현황, 토지계의 국·군·시·도 유지 임대여부에 따른 임의경작지 여부, 생활계 오염원의 배출부하, 원주공공하수처리장의 운영자료, 환경기초시설 및 폐수배출업소의 현황에 따른 문제점을 도출하였다.

또한 원주천의 수질개선을 위해 오염원별 수질개선 대책을 수립하였다. 특히 원주천 유역의 상류유역은 산림지역, 중류는 시가지지역, 하류는 하수처리장 등 하천 구간별 오염원 특성이 뚜렷한 유역이다. 따라서 수질개선 대책수립을 위해 원주천 유역의 특성을 고려하여 상류, 중류, 하류로 구분하고 각 구간별 맞춤형 수질개선대책을 제시하였다. 지속가능한 하천관리를 위해서는 유역 내 지자체·유역청, 민간단체, 지역주민 등이 연계된 유역거버넌스가 매우 중요하기 때문에 지역 사회의 관심 및 참여를 유도할 수 있는 거버넌스 구축 및 활동 계획을 제시하였다.

4. 유역모델을 이용한 수질개선 효과 평가

개선방안에 따른 수질개선 효과는 수질오염 저감 시나리오에 따라 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형 (Arnold, 1992; Aronld et al., 1998; Neitsch et al., 2005a; Neitsch et al., 2005b)을 이용하여 BOD, T-N 및 T-P을 중심으로 평가하였다. SWAT 모형의 지형 자료는 Fig. 3과 같이 국토교통부 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도 (1:5,000)로부터 격자크기 30 m DEM (Digital Elevation Model)을 제작하여 구축하였고, 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 중분류 토지이용도 (1:25,000)를 이용하였다. 토양도의 경우 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공하는 개략토양도 (1:50,000)를 활용하였으며, 기상자료는 SWAT 모형의 안정화 기간 (3년)을 고려하여 2015~2018년 원주기상관측소의 자료를 활용하여 구축하였다. 유입하천별 오염원 자료 (산업계, 축산계)의 경우 현장 조사를 통해 최종 업데이트된 자료를 기준으로 부하량을 산정하여 점오염원 형태로 적용하였다. SWAT 모형의 최적 매개변수 산정은 SWAT-CUP을 이용하였으며, 2018년 유입하천별 실측 모니터링 자료를 이용하여 원주천 말단 주산교와 흥양천, 화천, 신촌천 말단지점 총 4개 지점을 대상으로 산정하였다. 최적 매개변수 산정에 활용된 매개변수는 Table 3과 같으며, 유량의 적용성 평가는 NSE (Nash and Sutcliffe, 1970)와 결정계수 R^2 로 표현하였으며, 수질 항목 (BOD, T-N, T-P)의 경우에는 반복 측정에 대한 신뢰성을 나타내는 양적 지표인 %difference를 이용하였다. R^2 와 NSE는 1에 가까울수록 모델의 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것을 의미하며 0보다 작을 시 모델의 예측 결과와 실측 자료와의 일관성이 없음을 의미한다. 또한 %difference는 오차값이 작을수록 모델의 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것을 의미하는데, Donigian (2000)이 제시한 모델의 효율범위

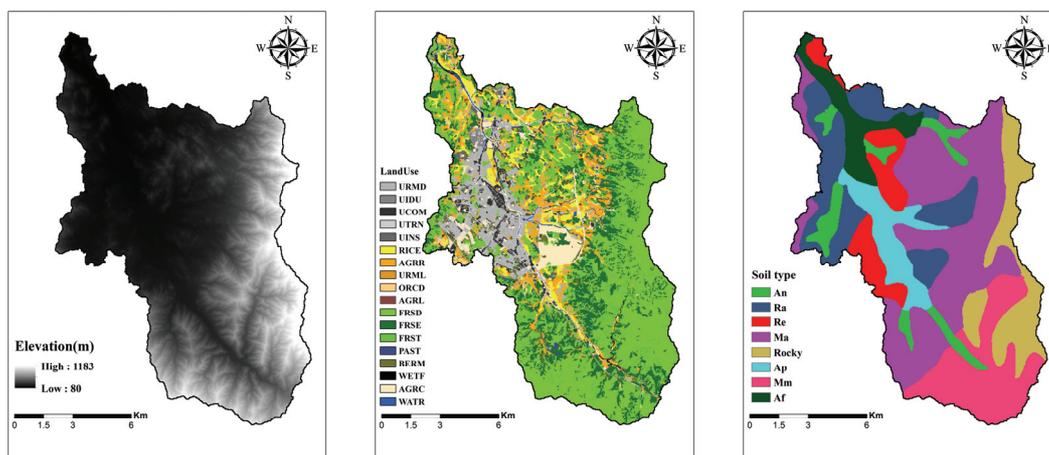


Fig. 3 Construction of SWAT input data in Wonju stream watershed (DEM, Landuse, and Soil, respectively)

Table 3 The parameters used in calibration

Parameter	Description	Method	Min	Max
CN2	SCS runoff curve number	multiplied	35	98
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	replaced	0	0
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm).	replaced	0	5000
CANMX	Maximum canopy storage	replaced	0	100
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	multiplied	0	1
ESCO	Soil evaporation compensation factor	replaced	0	1
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	multiplied	0	2000
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	replaced	0	150
GW_DELAY	Groundwater delay (days)	added	0	500
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	replaced	0.02	0.2
LAT_ORGN	Organic N in the baseflow (mg/l)	replaced	0	200
LAT_ORGP	Organic P in baseflow (mg/l)	replaced	0	200
SOL_CBN	Organic carbon content	replaced	0.05	10
RK1	Carbonaceous biological oxygen demand deoxygenation rate coefficient in the reach at 20°C	replaced	0.02	3.4
RK3	Rate of loss of carbonaceous biological oxygen demand due to settling in the reach at 20°C	replaced	-0.36	0.36
RS2	Benthic (sediment) source rate for dissolved phosphorus in the reach at 20°C	replaced	0.001	0.1
RS5	Organic phosphorus settling rate in the reach at 20°C	replaced	0.001	0.1
AI4	Rate of oxygen uptake per unit algal respiration	replaced	1.6	2.3

Table 4 Evaluation index using NSF and %difference (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)	-	15~20	10~15	<10
%difference (Nutrients)	-	25~35	15~25	<15

는 Table 4와 같다.

III. 연구결과

1. 유역 내 오염원 현황 및 발생

가. 주요 오염원 현황

2017년 국립환경과학원 전국오염원조사자료를 활용하여 오염원 현황을 조사하였다. 생활계의 경우 원주천 유역에 거주하는 총 인구수는 285,498명으로 2016년 대비 17,520명이 증가한 것으로 나타났으며, 양식계는 원주시 봉산동에 양식장 1개 업소가 위치해있으며 사료사용량은 100 kg/년으로 조사되었다. 매립계는 원주천 유역 내 태장동에 태장동 매립장이 운영 중인 것으로 나타났으며, 원주공공하수처리시설로 연계 처리되는 것으로 조사되었다. 그리고 주요 유입하천을 대상으로 축산계 오염원 현황을 조사한 결과 원주천 본류에는 총 112개의 축산농가 중 45개 축산농가가 위치해 있으며, 오염 부하가 적은 가금류를 제외하고 한우 사육 농가 27개 (604두수), 돼지 사육 농가 3개 (250두수), 젖소 사육 농가 1개 (42두수)로 조사되었다. 유입하천 중 흥양천에는 총 27개 축산농가로, 한우 사육 농가 16개 (325두수), 젖소 사육 농가 2개 (80두수)가 위치해 있는 것으로 조사되었다. 화천의 경우 총 34개 축산농가 중 22개 농가 (606두수)가 한우를 사육하는 것으로 조사되었으며, 2개 농가 (1,250두수)가 돼지를 사육하는 것으로 조사되었다. 신촌천의 경우 총 6개 축산농가 (43두수)가 모두 한우를 사육하는 것으로 조사되었으며, 원주천 상류

는 축산농가가 없는 것으로 조사되었다.

토지계의 지목구분에 따른 오염원 현황은 원주천 본류를 제외한 유입하천 중 흥양천에서 농경지 (전·답) 면적이 4.66 km²로 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 조사되었으며, 임야의 경우 원주천 본류를 제외한 유입하천 중 봉천에서 34.05 km²로 가장 높게 나타났다. 산업계 오염원의 경우 1일 폐수배출량이 700 m³ 이상 2,000 m³ 미만인 제 2종 사업장 1개소 (식품 제조업)가 운영 중인 것으로 나타났으며, 이외 3종 사업장 5개소, 4종 사업장 5개소, 5종 사업장 147개소가 운영 중인 것으로 나타났다. 원주천 본류를 제외한 유입하천 (흥양천, 화천, 봉천)에서는 5종 사업장이 총 23개소가 운영 중인 것으로 나타났다. 환경기초시설은 원주천 본류 소유역 내 가현동에 원주공공하수처리장 및 원주분뇨처리장, 우산동에 원주가 축분뇨처리시설이 운영 중인 것으로 조사되었다.

나. 발생·배출부하 분석 및 오염기여도 평가

원주천 유역을 대상으로 유입하천별/오염원별 BOD, T-N, T-P의 발생 및 배출부하량을 산정하고 오염기여도를 분석하였다 (Table 5, Table 6). 원주천 본류의 BOD, T-N, T-P 발생부하가 주요 유입하천 (흥양천, 화천, 봉천, 신촌천)에 비해 높게 나타났으며, 원주천 본류 다음으로 흥양천이 높게 나타났다. 축산계 오염원에 의한 발생부하 및 오염기여도는 흥양천에서 BOD 1,094.8 kg/일 (33.66%), T-N 248.6 kg/일 (34.07%), T-P 90.4 kg/일 (35.09%)로 가장 높게 나타났다.

산업계 오염원에 의한 발생부하 및 오염기여도는 환경기초

Table 5 Generation rates originated from population, livestock, industry, land, aquaculture, and landfill (in kg/day)

Stream name	WQ	Population	Livestock	Industry	Land	Aquaculture	Landfill
Wonju stream	BOD	16,023.8	1,524.1	4,081.3	474.8	0.0	1.2
	T-N	3,804.8	340.6	1,586.7	334.2	0.0	3.4
	T-P	422.6	117.7	173.5	25.1	0.0	0.0
Heungyang stream	BOD	949.5	1,094.8	1.2	74.0	0.0	0.0
	T-N	235.3	248.6	0.7	71.2	0.0	0.0
	T-P	25.9	90.4	0.1	5.4	0.0	0.0
Hwa stream	BOD	1,123.8	597.8	16.8	96.5	0.1	0.0
	T-N	284.4	132.4	6.0	85.1	0.0	0.0
	T-P	31.3	46.8	0.5	7.5	0.0	0.0
Sinchon stream	BOD	31.7	26.0	0.0	16.3	0.0	0.0
	T-N	8.3	5.7	0.0	22.5	0.0	0.0
	T-P	0.9	1.8	0.0	1.3	0.0	0.0
Bong stream	BOD	33.7	10.3	0.0	50.8	0.0	0.0
	T-N	9.6	2.4	0.0	69.5	0.0	0.0
	T-P	1.0	0.8	0.0	2.7	0.0	0.0

Table 6 Discharge loads released from population, livestock, industry, land, aquaculture, and landfill (in kg/day)

Stream name	WQ	Population	Livestock	Industry	Land	Aquaculture	Landfill
Wonju stream	BOD	1,041.7	208.8	21.2	473.3	0.0	1.5
	T-N	1,411.9	107.8	50.5	378.1	0.0	4.7
	T-P	36.3	11.9	0.8	25.3	0.0	0.1
Heungyang stream	BOD	55.8	125.4	0.1	73.4	0.0	0.0
	T-N	24.0	69.2	0.1	70.9	0.0	0.0
	T-P	2.4	7.9	0.0	5.4	0.0	0.0
Hwa stream	BOD	95.9	96.0	0.5	93.2	0.1	0.0
	T-N	38.6	47.3	0.4	83.1	0.0	0.0
	T-P	4.0	5.7	0.1	7.4	0.0	0.0
Sinchon stream	BOD	6.2	3.3	0.0	16.3	0.0	0.0
	T-N	2.7	1.7	0.0	22.5	0.0	0.0
	T-P	0.3	0.2	0.0	1.3	0.0	0.0
Bong stream	BOD	12.6	1.5	0.0	50.8	0.0	0.0
	T-N	5.6	0.7	0.0	69.5	0.0	0.0
	T-P	0.6	0.1	0.0	2.7	0.0	0.0

시설 및 산업계 시설이 다수 위치해 있는 원주천 본류에서 가장 높게 나타났으며, 화천에서 두 번째로 높게 발생하는 것으로 나타났다. 토지계 오염원에 의한 발생부하 및 오염기여도는 본류를 제외한 유입하천 중 농경지 비율이 높은 화천에서 BOD 96.5 kg/일 (13.55%), T-N 85.1 kg/일 (14.61%), T-P 7.5 kg/일 (17.86%)로 가장 높게 나타났다.

오염원별/유입하천별 BOD와 T-N, T-P 배출부하 및 오염기여도를 산정한 결과, 원주천 본류에서 BOD와 T-N, T-P 배출부하가 가장 높게 나타났으며, 원주천 본류 다음으로 화천이 높게 배출되는 것으로 나타났다. 본류를 제외한 유입하천 중 생활계 오염원에 의한 배출부하 및 오염기여도는 화천에서 각각 BOD 95.9 kg/일 (7.91%), T-N 38.6 kg/일 (2.60%), T-P 4.0 kg/일 (9.17%)로 가장 높게 나타났으며, 축산계 오염원에 의한 배출부하 및 오염기여도는 홍양천에서 BOD 125.4 kg/일 (28.83%), T-N 69.2 kg/일 (30.51%), T-P 7.9 kg/일 (30.50%)로 가장 많은 오염부하가 배출되는 것으로 나타났다.

산업계 및 토지계 오염원에 의한 배출부하 및 오염기여도는 발생부하 및 오염기여도의 경향과 동일하게 원주천 본류에서 가장 높게 나타났으며, 이외 화천, 홍양천, 봉천 순으로 높게 나타났다. 특히 봉천에서의 오염원별 전체 배출부하는 신촌천의 배출부하보다 높게 나타났는데 이는 토지계 오염원에 따른 영향으로 판단되며, 원주천 상류에 위치한 봉천 소유역 또한 토지계 오염원 저감을 위한 관리대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

다. 오염원 현장 조사

배출부하량 분석 결과 축산계 주요 우심하천으로 분석된 홍양천과 화천 유역을 대상으로 축산계의 오염원 현장 조사를 실시한 결과 112개의 축산 농가 중 폐업 또는 추가 조사된 농가를 포함하여 총 98개의 축산 농가가 운영되고 있는 것으로 나타났다. 홍양천 유역의 경우 총 사육농가는 27개 농가에서 현장 조사 후 21개 농가로 줄어든 것으로 나타났으며, 원단위 부하량이 큰 한우의 경우 325두에서 268두로 줄어든 것으로 나타났다. 화천의 경우도 총 사육농가는 34개에서 현장 조사 후 26개로 줄어든 것으로 나타났으며, 한우의 경우 606두에서 378두로 줄어든 것으로 나타났다. 현장 조사 결과 28개소 (646두)의 우사에서 3,443 m³/년 (9.4 m³/일)의 우분이 발생하는 것으로 조사되어 전국오염원조사자료를 통한 우분 발생량 약 4,961 m³/년 (13.6 m³/일), 돈분 발생량 3,924 m³/년 (10.8 m³/일)과는 차이가 발생되는 것으로 나타났다. 축산계의 주소 불명확, 분뇨처리방법, 폐업 또는 이전, 신규 농가 등의 자료가 업데이트 되지 않은 상태로 축산계의 정확한 오염원의 발생부하 및 배출부하를 산정하기 위해서는 원활한 자료협조 또는 데이터 업데이트가 필요한 것으로 판단된다.

홍양천과 화천의 유역에서 비가림시설, 방지턱, 개별처리 농가의 농경지 방치 등을 기준으로 방치축분을 조사한 결과 한우농가에서는 12개소에서 1,652 m³의 축분이 제대로 관리되지 않는 것으로 나타났으며, 돈사에서는 2개소 (361 m³/년 (1.0 m³/일)) 모두 개별처리 없이 하천으로 배출하는 것으로 나타났다. 현장조사 결과를 바탕으로 관련 지자체에서 축분

Table 7 Pollution load and contribution to each stream

Site name	Watershed Area (km ²)	BOD (kg)	Contribution (%)	T-N (kg)	Contribution (%)	T-P (kg)	Contribution (%)
WJS1	152.72	89,934.7	-	59,766.4	-	2,395.2	-
HYS	21.05	747.8	0.83	2522.0	4.22	42.6	1.78
HS	24.68	754.9	0.84	2370.8	3.97	48.6	2.03
SCS	8.54	228.0	0.25	1185.7	1.98	9.0	0.38

*WJS: Wonju stream, HYS: Heungyang stream, HS: Hwa stream, SCS: Sinchon stream

관리 미흡과 하천 방류 농가를 재답사하였으나 시설 노후화 개선요구 및 축분방지에 대한 시정조치 등 근본적인 대책이 필요할 것으로 판단된다.

산업계의 경우 종별 분류 기준에 따라 원주천 유역 내 사업장 170개소에 대해 현장 조사 결과 168개 사업장이 운영되는 것으로 조사되었으며, 폐수방류량이 2,807.6 톤/일에서 2,378.9 톤/일로 약 15.3%가 줄어든 것으로 나타났다. 또한, 168개소 중 12개소 (37.0 m³/일)에서 원주천으로 개별 처리 후 직접방류 하는 것으로 조사되었다. 개별처리 후 방류하는 12개소의 업소 중 협조가 가능한 4개 업소를 대상으로 수질 농도를 분석한 결과 평균 BOD 4.2 mg/L, T-N 6.416 mg/L, T-P 0.059 mg/L로 폐수배출허용기준을 밑도는 것으로 나타났다. 하지만 권고 불이행 및 무단방류 등으로 인한 문제 발생여지가 매우 큰 것으로 판단되며, 원주천 내 위치하고 있는 폐수 배출사업소 중 하수처리구역으로 편입되지 않고 폐수배출업소와 개별처리 후 직접 방류하는 업체들의 정기적인 모니터링과 관리가 필요할 것으로 판단된다.

라. 유입하천별 오염부하 분석

2008년 2월부터 2019년 5월까지 월 약 2회 유량 및 수질 모니터링을 통해 구축된 자료를 바탕으로 원주천 말단 (WJS1) 및 주요 유입하천별 유량 및 수질 농도 및 오염부하를 비교 분석하였다 (Table 7). 원주천 말단 및 주요 유입하천별 평균 유량은 각각 4.857 m³/s (WJS1), 0.332 m³/s (HYS), 0.318 m³/s (HS), 0.123 m³/s (SCS)로 분석되었고, 원주천 말단에 위치한 원주공공하수처리장 (WJS2)의 2018년도 일평균 1.478 m³/s 가 방류되고 있어, 원주천 말단 (WJS1) 유량의 약 30%를 차지하는 것으로 나타났다. 유량이 가장 적은 신촌천 (SCS)의 평균 수질농도는 BOD가 2.3 mg/L이며, T-P가 0.065 mg/L 인 것으로 나타났으며, 화천 (HS)은 BOD 1.3 mg/L, T-P 0.064 mg/L인 것으로 나타났다. 화천 (HS)과 유량이 비슷한 흥양천 (HYS)의 경우 BOD 1.1 mg/L, T-P 0.051 mg/L로 화천 (HS)보다 다소 낮은 것으로 나타났다. 원주천 하류에 있는 원주공공하수처리장에서 방류되어 원주천으로 유입되는 하수처리장 방류구 (WJS2)지점의 평균 BOD 농도는 20.5 mg/L, T-P 0.292

mg/L 인 것으로 나타났으며, 원주공공하수처리장의 방류수와 합류되어 통과하는 원주천 말단 (WJS1) 지점의 평균 BOD는 13.0 mg/L, T-P 0.202 mg/L로 나타났다. 원주천의 유입하천에서 측정된 수질농도는 대체적으로 안정된 수질농도를 유지하다가 원주공공하수처리장의 유입으로 인해 원주천 말단에서 급격히 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 원주천의 수질개선을 위해서는 수질농도를 급격히 변화시키는 원주공공하수처리장의 근본적 시설개선과 방류수의 안정적인 배출을 위한 추가적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

원주천 분류 및 주요 유입하천별 오염부하 기여도 분석 결과, BOD 기준으로 화천 (HS), 흥양천 (HYS)에서 원주천 본류로의 오염부하 기여율이 각각 0.84%, 0.83%로 유사하게 나타났으며, 신촌천 (SCS) 오염부하 기여율은 0.25%로 낮게 나타났다. T-N의 경우 흥양천 (HYS)에서 2,522 kg (4.22%)로 가장 큰 것으로 나타났으며, T-P의 경우 화천 (HS)에서 48.6 kg (2.03%)로 원주천 본류에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

또한 주요유입하천 외에 원주천에 유입되는 하천들과 원주공공하수처리장 (WJS2)과 원주천말단 (WJS1) 중간에 위치하고 있는 유입하천들을 대상으로 추가 현장조사를 실시하였으며, 원주천 유역 내 오염우심구간을 파악하였다 (Table 8). 모니터링 지점 중 평균 유량은 원주공공하수처리장 방류구 (WJS2)에서 원주천으로 유입되는 유입량이 1.459 m³/s로 가장 높은 것으로 조사되었으며, 이 외에 봉천 (BS) 0.424 m³/s, 단계천 (DGS) 0.113 m³/s, 입춘내천 (ICNS) 0.036 m³/s 순으로 조사되었다. BOD, T-N, T-P 수질 농도 경우 원주공공하수처리장 방류구 (WJS2)에서 수질 농도 변화 폭이 가장 큰 것으로 조사되었다. 유입하천 중 BOD, T-N 농도의 경우 봉천 (BS), 단계천 (DGS), 입춘내천 (ICNS) 순으로 변화 폭이 큰 것으로 나타났으며, T-P 농도 변화 폭 경우 단계천 (DGS)에서 가장 큰 것으로 나타나 농도 저감을 위한 자연정화 기능 확대 및 오염방지 시설 도입이 필요할 것으로 판단된다.

상기 결과를 종합적으로 검토하였을 때 수질 변동 폭이 가장 큰 원주공공하수처리장 방류수 (WJS2)의 경우 원주천 본류 하천 수질에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 원주천 본류 및 말단의 근본적인 수질오염을 개선하기 위해서는 공

Table 8 Water flow and quality monitoring for the Wonju public sewage treatment plant

Sites	Flow (m ³ /s)	BOD (mg/L)			T-N (mg/L)			T-P (mg/L)		
		avg.	max.	min.	avg.	max.	min.	avg.	max.	min.
BS	0.424	0.5	1.1	0.2	4.175	7.390	1.836	0.027	0.056	0.006
SCS	0.123	2.3	15.2	0.2	4.202	8.513	1.854	0.065	0.318	0.000
WJS6	0.444	1.4	5.2	0.5	4.836	7.699	3.209	0.047	0.116	0.012
ICNS	0.036	1.9	2.5	1.3	4.923	9.950	2.381	0.077	0.101	0.047
WJS5	1.519	1.5	2.9	0.4	4.615	8.021	3.125	0.032	0.146	0.000
DGS	0.113	3.2	6.4	1.4	5.535	8.885	3.019	0.198	0.297	0.108
HYS	0.332	1.1	3.1	0.5	3.916	5.635	2.114	0.051	0.133	0.015
WJS3	1.629	2.0	6.9	0.4	4.315	6.698	2.825	0.047	0.108	0.000

*BS: Bong stream, SCS: Sinchon stream, WJS: Wonju stream, ICNS: Ibchunnae stream, DGS: Dangye stream, HYS: Heungyang stream

공하수처리장에서의 미처리 유기물질 및 영양염류의 제거를 위한 고도처리시설 확충과 원주공공하수처리장의 효율적인 운영관리를 통한 방류수 수질개선 방안 등이 대책으로 수립되어야 할 것으로 판단된다. 이외 원주천 본류로 유입되는 하천에서는 화천 (HS), 홍양천 (HYs)이 오염우심구간으로 파악되었는데, 축산계 및 토지계 오염원의 영향으로 판단되며, 원주천 본류 수질 개선을 위해서는 홍양천 및 화천 유역 내 가축분뇨를 관리하기 위한 방안과 토지계 오염원 저감을 위한 농경지 BMPs 설치 등 오염원 저감 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

2. 오염원별 관리 문제점 도출

축산계는 축분뇨 관리의 현장 조사를 바탕으로 우사의 경우 12개소 (310두)에서 축분을 비가림시설이 있는 장소에 관리하지 않고 방치하거나 인근 밭에 야적하여 강우시 오염원 유출에 취약한 것으로 조사되었다. 또한, 2개소의 돈사에서는 분뇨를 개별처리하거나 위탁시설로 이송하지 않고, 직접 하천으로 방류되는 것으로 조사되었다. 따라서 우사와 돈사 분뇨를 적절히 관리 및 처리하기 위한 비가림시설과 방지턱 설치, 처리장 연계와 같은 시설 개선과 시민단체나 지역주민에 의한 정기적인 점검, 홍보나 거버넌스를 통한 주민의식을 변화시켜야 할 것으로 판단된다.

토지계는 BOD 기준 생활계 다음으로 배출부하가 높은 것으로 나타났다. 농경지 비율과 배출부하가 높은 유입하천을 대상으로 농업 비점오염원 저감 대책이 필요할 것으로 판단된다. 국립환경과학원의 ‘오염총량관리를 위한 농업비점 삭감 실증화 연구 (2018)’에 따르면 논에서 물꼬관리를 할 경우 관행대비 T-N은 24%, T-P는 34%의 오염부하 저감 효과가 있다고 하였으며, 일반비료 대신 완효성비료를 사용하면 T-N은 22%, T-P는 22%의 저감효과가 있다고 하였다. 또한 밭에서

토양의 표면을 벗겨거적 등으로 피복할 경우 일반 밭 대비 BOD 66.6%, T-N은 62.5%, T-P는 67.8%의 오염부하 저감효과가 나타난다고 하였다. 기존 연구결과와 같이 토지계 배출부하 비율이 높은 홍양천, 화천 및 신촌천을 대상으로 최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs)을 도입하여 오염물질의 배출을 저감시켜야 할 것으로 판단된다. 또한 하천변에서 이루어지고 있는 영농활동은 오염물질이 하천으로 바로 유입되기 때문에 수질관리에 큰 영향을 미칠 수 있는데, 임의경작의심지역을 조사한 결과 영농활동이 이루어지고 있는 농경지가 다수 있는 것으로 조사되었다. 따라서 추가 현장조사를 통해 임의경작지의 원상복구를 위한 경고문 등의 조치가 필요한 것으로 판단된다.

생활계는 원주천 유역 전체 BOD 오염부하량 중 약 50% 이상을 차지하고 있다. 그러나 원주시 일부 지역들은 20년 이상 노후된 차집관개가 매설되어 있고, 연약지반인 하천에 매설되어 있어 침하 발생시 역구배 및 역단차로 인한 유속 및 통수단면 확보에 문제가 발생할 수 있다. 이에 우수·오수 관거의 개량계획과 신설계획이 필요할 것으로 판단된다. 또한 원주시는 인구 증가에 따라 생활계 오염부하는 지속적으로 증가될 것이고, 향후 원주공공하수처리장의 관리가 매우 중요할 것으로 판단된다. 하지만 원주공공하수처리장의 경우 방류수 수질기준에 따라 1일 하수처리용량 500 m³ 이상의 III 지역 (환경부장관이 정하여 고시하는 지역)으로 BOD 경우 10 mg/L, T-P 0.5 mg/L 이하로 방류하도록 규정되어 있지만 수질원격감시체계 TMS (2015.1.1.~2018.11.21) 방류수 수질 자료를 확인 결과 BOD 10 mg/L 이상 농도로 방류되는 경우가 발생되고 있으며, 현장조사를 통한 방류수 수질분석 결과 BOD와 T-P 항목에서 일부 기준 수질농도를 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 원주공공하수처리시설 하류에 위치한 원주천2 (주산교) 지점의 수질 농도 분석 결과에서도 BOD 10mg/L

를 상회하는 것으로 나타났다. 따라서 원주천 유역의 수질관리를 위한 원주공공하수처리장의 안정적인 수질 배출을 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다. 또한 원주천 유역 내 위치한 산업계 시설 중 12개소는 약 37.0 m³/일을 개별처리 후 원주천으로 직접 방류하는 것으로 나타났다. 따라서 하수처리구역으로 편입되지 않고, 개별처리 후 직접 방류하는 업체의 하수처리구역 편입이 필요할 것으로 판단된다.

3. 수질개선대책 도출

가. 구간별 수질개선대책

원주천 상류구간의 BOD 배출부하량은 축산계가 약 18.3%, 토지계가 약 29.7%를 차지하고 있을 정도로 농업과 축산에 의한 영향이 큰 유역이다. 또한 원주천 내 축산농가가 밀집되어 있는 홍양천과 화천 유역을 대상으로 현장 조사를 실시한 결과 28개 농가 중 12개 농가에서 축분을 제대로 관리하지 못하거나 방치하고 있어 강우시 오염물질이 하천으로 유입될 우려가 있다. 원주시와 원주지방환경청에서는 방치축분 발견시 원주시·지역퇴비화업체와 연계하여 수거 조치 및 유출방지턱, 비가림시설, 우수배제시설 등 유출저감시설 설치 사업 확대와 더불어 축사시설 관리강화 및 적정시비 등의 관련교육이 농업기술센터를 중심으로 필요할 것으로 판단된다. 토지계에서는 일부 임의경작지이 이루어지고 있어 토지계 비점오염원 저감을 위한 발생원 관리 및 최적관리기법(BMPs) 등의 대책이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 토지계에서 배출되는 오염물질을 저감하기 위해 생태둠벙, 소규모 침사지, 우회수로, 사면보호, 완충식생대, 물꼬관리, 완효성비료, 지표피복 등의 적극적인 도입이 필요하다.

원주천 중류구간은 전형적인 도시지역으로 불명수의 하천 유입 방지를 위해 우·우수관로 시설 보수 및 신설이 매우 중요하다. 노후화되고 불량한 우수 차집관거 시설(28.7 km) 및 우수관로 개량사업(43.6 km)을 통해 오수의 하천 유출 방지 및 하수처리시설 처리효율을 증대해야할 것이다. 이뿐만 아니라 원주천 우수관로 현장조사를 진행하여 불명수 유입을 파악하고 우수관로 및 하수맨홀 준설을 통해 퇴적된 오염물을 제거하여 하수처리시설로의 유입을 방지해야할 것이다. 또한 원주시 인근의 춘천시에서는 오염원의 유입을 최소화하기 위해 SS는 80% 저감, 초기우수 2,000톤 대상 저감효율 100%를 목표로 도심비점오염저감시설 설치사업을 진행하였다. 원주시도 도심지역 우수관로 하단에 소규모 침사지, 비점오염저감시설 설치 등 오염원 유입차단을 위한 시설 설치 검토가 필요할 것이다. 그리고 산업계 시설에 대해서는 하수처리장 연계 또는 주기적 방류수 점검이 필요할 것으로 판단된다.

원주천 하류구간은 원주시하수처리장의 방류수가 가장 큰

영향을 미치는 구간으로서 공공하수처리장과 원주천 말단(섬강 합류부) 구간의 자연정화를 극대화 할 수 있는 비점오염 저감시설 및 저감효과(BOD 99.4%, T-N47.8%, T-P 66.7% 제거)가 높은 생태하천복원 사업의 추진이 필요할 것으로 판단된다. 특히 원주시에서는 방류수 수질 강화(T-P 0.5→0.4 mg/L)에 따른 시설 개선을 추진하고 있으며, 하수처리장 기술진단(한국환경공단)을 통한 시설개선(안) 마련 및 시설 개선을 추진·실행하고 있으며 원주천 내 하수처리구역 외 지역의 하수도 보급률을 2030년까지 호저면 기준 9.3% (2013년 기준)에서 30.5% 확대 계획을 수립하였다.

그리고 지속가능한 하천관리를 위한 거버넌스 구축이 필요할 것으로 판단된다. 이미 원주시에는 원주천살리기 민관협의회가 구성되어 있어 이를 중심으로 거버넌스 구축 및 활동계획을 수립하였다. 본부는 민간단체와 행정기관 그리고 군부대 등의 구성을 통해 원주천 본류 구간 불명수 유입지점 모니터링, 축사의 축분 방치 모니터링, 하천의 정화활동 등을 실시한다. 이를 위해 소유역 거버넌스 구성원 활동의 공유, 하천살리기 시민모니터링단의 양성과정 운영, 하천살리기 시민아카데미(청소년, 대학생, 시민) 운영, 원주천 본류 및 유입하천의 수질 및 수생태 모니터링 결과 공유, 하천살리기 조례 제정 및 수돗물 아껴 쓰기 시민운동 전개, 원주천 본류의 정수구역에 따른 문제점 도출 및 자연정화 기능 확대를 위한 노력 등이 필요할 것으로 사료된다.

나. 수질개선효과 분석

원주천 유역 내 말단 및 유입하천별 2018년 실측 모니터링 자료를 이용하여 유량 및 수질 보정을 실시하였다(Table 9). 원주천 말단 및 유입하천별 유량 보정 결과, 결정계수(R²)는 0.81~0.89 범위로 나타났으며 모델 효율성 계수(NSE)는 0.70~0.87 범위로 나타났다. 따라서 원주천 말단 및 유입하천별 유량 보정 결과는 실측치를 잘 반영하는 것으로 판단된다. 또한 수질 항목에 대해서는 %difference를 기준으로 모델 적용성을 평가하였으며, BOD 수질 경우 신촌천 “Good” (15~25%)을 제외한 말단 및 홍양천, 화천에서 “Very Good” (<15%)으로 평가되었다. 또한 T-N, T-P 수질에 대해서는 말단 및 3개 유입하천 모두 “Very Good” 수준 이상으로 적용성 결과가 매우 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 구축된 SWAT모형을 이용하여 원주천 말단에서의 오염부하 저감 효과를 분석하고자 축산계, 산업계, 토지계 등 주요 오염원을 고려한 수질오염 저감 시나리오를 구축하고 유역 모델링 내 적용을 통해 시나리오별 BOD, T-N, T-P 항목에 대한 오염부하 저감 효과를 분석하였다(Table 11). 시나리오 적용시 SWAT 모형은 우리나라 논에서 이루어지고

Table 9 List of calibrated parameters

Parameter	Method	WJS1	HYS	HS	SCS
CN2	multiplied	0.945	0.863	0.995333	0.959
ALPHA_BF	replaced	80.43375	0.43705	0.458333	0.43855
GWQMN	replaced	162.5	1287.5	1125.5	707.2575
CANMX	replaced	3.0135	3.0995	3.0325	3.0065
SOL_AWC	multiplied	1.15437	1.154377	1.154377	1.154377
ESCO	replaced	0.4403	0.4411	0.4751	0.4521
SOL_K	multiplied	0.841061	0.841061	0.841061	0.841061
SLSOIL	replaced	17.46399	17.46398	17.46398	17.46397
GW_DELAY	added	8240.909	240.9089	464.1667	240.9089
GW_REVAP	replaced	0.045675	0.049125	0.1871	0.047175
LAT_ORGN	replaced	4.2	4.3	5	4.5
LAT_ORGP	replaced	0.095	0.008	-	0.023
SOL_CBN	replaced	8.5	-	-	10
RK1	replaced	0.03	-	-	0.05
RK3	replaced	0.1	-	-	0.08
RS2	replaced	0.003	-	-	-
RS5	replaced	0.1	-	-	-
AI4	replaced	0.5	0.5	0.5	0.5

*WJS: Wonju stream, HYS: Heungyang stream, HS: Hwa stream, SCS: Sinchon stream

Table 10 Applicability of SWAT model to water quality determination

Site name	Flow		BOD		T-N		T-P	
	R ²	NSE	%differ.	Grade	%differ.	Grade	%differ.	Grade
WJS1	0.85	0.82	9.90	Very Good	(-)3.5	Very Good	(-)14.2	Very Good
HYS	0.82	0.73	7.80	Very Good	(-)2.1	Very Good	(-) 2.7	Very Good
HS	0.89	0.87	(-)6.50	Very Good	(-)5.4	Very Good	(-)14.4	Very Good
SCS	0.81	0.70	22.10	Good	(-)2.8	Very Good	(-) 1.8	Very Good

*WJS: Wonju stream, HYS: Heungyang stream, HS: Hwa stream, SCS: Sinchon stream

Table 11 Scenarios for water quality improvement

Scenario	Description	Applied source
Scenario 1	Rain roof facility and runoff bump installation	Livestock
Scenario 2	(1) Discharged water quality improvement and (2) Individual sewage wastewater treatment facility linkage to public wastewater utilities	Industry
Scenario 3	(1) Vegetated buffer strip and (2) Rice straw mulching installation to agricultural field	Land

있는 담수상태, 관개량 및 관개일정 제어 등을 충분히 모사하지 못하기 때문에 시나리오 분석에서 제외하고 밭에 대해서만 고려하였다.

시나리오 1은 원주천 유역 내 비가림 시설 및 유출방지턱 등의 가축분뇨 유출 방지시설이 제대로 갖추어있지 않은 축

산 농가에 대해 가축분뇨 유출방지시설을 설치했을 경우이며, 시나리오 2는 원주천으로 직접방류하고 있는 산업계 시설 사업장에 대해 공공하수처리장 연계 및 개별처리시설 시설 강화를 통해 폐수방류량을 전량 저감하는 것과 원주하수공공처리장 방류수 수질을 개선하는 것이다. 마지막으로 시나리오3

Table 12 Pollution load reduction effect by scenario (%)

Scenario	BOD	T-N	T-P
Scenario 1	0.025	0.236	0.249
Scenario 2 (1)	0.003	0.095	0.030
Scenario 2 (2)	11.060	23.560	10.600
Scenario 3 (1)	3.890	1.230	3.320
Scenario 3 (2)	5.210	0.783	2.801

은 원주천 유역에 위치한 홍양천, 화천, 신촌천 소유역 내 경작지에 초생대와 벧짚피복을 설치하는 경우이다.

각 시나리오 적용은 시나리오 1의 경우 전체 축산농가 중 오염원 현장 조사를 통해 가축분뇨 유출방지시설이 설치되어 있지 않은 축산농가에서의 수질 항목별 오염부하 값에 KDI (2009)에서 제시된 가축분뇨 유출방지시설 설치에 따른 오염 저감 효율을 곱하여 산정된 값을 축산계 점오염원 입력 자료로 활용하여 가축분뇨 유출방지시설 설치 유무에 따른 수질 오염 저감 효과를 비교 분석하였다. 시나리오 2의 경우 원주천 본류로 직접 폐수를 방류하는 12개의 사업장에서의 오염부하의 값을 전량 저감한다는 것을 가정하여 기존 산업계 점오염원 입력 자료에서 제외하였으며, 2018년 원주공공하수처리장의 일별 방류량 및 수질 자료 중 평균치 (BOD 3.9 mg/L, T-N 10.43 mg/L, T-P 0.135 mg/L) 수질 농도를 초과하는 수질 값에 대해 평균치로 개선되었을 경우를 가정하여 방류량 입력 자료를 수정하여 활용하였다. 시나리오3의 경우 원주천 유역 내 유입하천별 경작지에 해당하는 hru를 추출하여 SWAT 모델 내 Filter strip 기능을 통해 초생대 1 m를 적용하였으며, 벧짚피복의 경우 Jang et al. (2010)이 제시한 벧짚피복에 따른 범용토양유실공식 (Universal Soil Loss Equation, USLE)의 보전관리인자 (P) 추정 공식을 이용하여 산정된 값을 경작지별 hru에 적용하여 벧짚피복 설치에 따른 오염부하 저감 효과를 비교 분석하였다.

시나리오 1을 적용하여 각 유입하천 말단에서의 총 오염부하를 기준으로 저감효과를 산정한 결과 홍양천 말단에서의 BOD, T-N, T-P 수질 항목에 대한 오염부하 저감 효율은 각각 BOD 0.068%, T-N 0.276%, T-P 0.354%로 나타났으며, 화천의 경우 각각 BOD 0.363%, T-N 3.870%, T-P 2.975%로 나타났다. 최종적으로 원주천 말단 경우 BOD 0.025%, T-N 0.236%, T-P 0.249%로 나타났다. 하천에서의 총 오염부하를 기준으로 산정한 저감효율은 높지 않은 것으로 나타났으나, 축사자체에서는 가축분뇨 유출 방지시설 설치에 따른 오염부하 저감 효과가 BOD 27.99 kg/일 (19.5%), T-N 13.97 kg/일 (20.7%), T-P 1.47 kg/일 (25.3%)로 나타나고 있어 (HGWMC, 2018), 발생원에서의 효과는 클 것으로 판단된다.

시나리오 2 적용 결과 원주천 유역내 산업계 시설의 폐수를 저감했을 때 원주천 말단에서 오염부하 저감효율은 BOD 0.003%, T-N 0.095%, T-P 0.030%로 나타났으며, 원주하수공공처리장 방류수 수질을 개선하였을 경우에는 원주천 말단에서의 오염부하 저감 효율은 BOD 11.06%, T-N 23.56%, T-P 10.60%로 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다.

시나리오 3 적용 결과 각 유입하천 내 경작지에 대해 초생대를 설치하였을 경우 폭에 따라 오염부하 저감 효율은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 경제적 비용, 설치 여건 등을 고려하여 초생대 폭 1 m를 설치하였을 경우 원주천 말단에서의 오염부하 저감 효율은 BOD 3.89%, T-N 1.23%, T-P 3.32%로 나타났다. 또한 벧짚피복을 설치하였을 경우 원주천 말단에서의 오염부하 저감 효율은 BOD 5.21%, T-N 0.783%, T-P 2.801%로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 현장 중심의 오염원 현장 조사와 하천 유량 및 수질조사를 통해 원주천의 수질 문제를 파악하고 수질 개선을 위한 수질관리대책을 도출하였다. 오염원 조사 결과 원주천 본류의 오염부하량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 주요 유입하천 중 화천, 홍양천, 그리고 신촌천 순으로 오염부하량이 높게 나타났다. 하천 모니터링을 통한 오염부하 분석 결과에서도 홍양천과 화천이 원주천의 수질에 미치는 기여율이 다른 하천에 비해 높은 것으로 조사되었다. 화천과 홍양천은 축산계와 토지계의 영향이 다른 하천에 비해 높기 때문에 원주천 본류 수질 개선을 위해서는 홍양천 및 화천 유역 내 가축분뇨를 관리하기 위한 방안과 토지계 오염원 저감을 위한 농경지 최적관리방안의 도입 등 오염원 저감 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다. 각 구간별 맞춤형 수질개선대책 수립을 위해 상류구간은 농업과 축산의 영향이 큰 유역으로 축분 관리 및 토지계 발생원의 관리대책, 중류구간은 전형적인 도심지역으로 불명수의 하천유입 방지를 위한 대책과 도심비점 오염저감시설의 도입을 제시하였다. 하류구간의 경우 원주시

하수처리장 방류수가 가장 큰 영향을 미치는 구간으로 하수처리장의 시설개선 계획과 산업시설의 하수처리장 연계가 절실히 필요한 것으로 분석되었다. 또한 향후 지속가능한 수질 개선을 위해 지역 주민들의 관심과 참여를 바탕으로 하는 지역 거버넌스의 구축과 지원이 매우 중요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 연구수행의 일환으로 수행되었습니다.

This research is a part of Environmental Fundamental Data Examination project of River Hangang Basin Management Committee.

REFERENCES

1. Arnold, J. G., 1992. Spatial scale variability in model development and parameterization. Ph.D. Diss., West Lafayette, Ind.: Purdue University.
2. Arnold, J. G., and R. Srinivasan, 1994. Intergration of a BASIN scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin, Journal of the American Water Resources Association* 30(3): 453-462. doi:10.1111/j.1752-1688.1994.tb03304.x.
3. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modelling and assessment: part I model development, *Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
4. Donigian, 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 2000 Washington, D.C., USA Office of Water, Office of Science and Technology.
5. Jang, S. W., H. J. Yoon, and W. C. Seo, 2015. Analysis of the estuary outflow characteristics of floating debris in the downstream of Nakdong river using satellite location tracking buoys. *Journal of the KIECS* 10(2): 157-164 (in Korean).
6. Jang, S. W., and H. J. Yoon, 2017. Estimation of movement amount of river floating debris based on effective rainfall and flow rate. *Journal of the KIECS* 12(1): 237-242 (in Korean).
7. Jang, W. S., Y. Park, J. Kim, N. Kim, J. Choi, Y. S. Ok, J. E. Yang, and K. J. Lim, 2010. Development of the SWAT DWDM for accurate estimation of soil erosion from an agricultural field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 79-88 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2010.52.1.079.
8. Kim, D. S., 2020. A Study on the introduction of advanced water treatment process for waboo water treatment plant by the analysis of raw water quality in Paldang lake. M.S. diss., Chungang, Ind.: Chungang University (in Korean).
9. Kyonggi Development Institute (KDI), 2009. A study on the establishment of an efficient management system for small scale livestock manure treatment facilities (in Korean).
10. Lim, K. J., 2018. Study of water pollution characteristics and pollution reduction plan during dry season for major streams flowing into South-Han river. Hanam, Gyeonggi: Hang Gang Watershed Management Committee (in Korean).
11. Ministry of Environment (ME), 2008. Seom river mid-watershed water environment management plan in 2008 (in Korean).
12. National Institute of Environmental Research (NIER), 2019. Technical guidance of TMDL (in Korean).
13. Neitsch, S. L., G. J. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005a. *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005*. Texas: USDA, ARS.
14. Neitsch, S. L., G. J. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005a. *Soil and water assessment tool user's manual version 2005*, Texas: USDA, ARS.
15. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 27(3): 282-290.