

Research Paper

수량-수질 통합모니터링 자료를 활용한 남강댐 상류 오염부하 특성 분석

최정규 · 박형석 · 이혜숙 · 정선아 · 한지현

한국수자원공사

Analysis of Pollutant Loads Characteristics using Water Quantity and Quality Integrated Monitoring Data in the Upstream of Namgang Reservoir

JungKyu Choi · HyungSeok Park · HyeSuk Yi · SunA Chong · JiHyun Han

Korea Water Resources Corporation

요약: 본 연구는 남강댐 상류에 위치한 주요 하천 지점들을 대상으로 수량-수질 통합모니터링 자료를 활용하여 오염부하 특성을 정량적으로 분석하였다. 연구 대상 지점에는 자동 측정 장비를 설치하여 1시간 간격으로 유량과 T-P 농도를 측정하였고, 이 데이터를 바탕으로 일평균 유달부하량을 산출하였다. 2023~2024년 데이터를 분석한 결과, 여름철과 홍수기에 부하량이 집중되는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 특히 임천 지점에서 가장 높은 유달부하량과 유달률이 확인되었다. 비점오염원이 전체 배출부하의 약 85%를 차지하는 것으로 나타나, 유역 내 토지 및 축산 관리의 중요성이 강조되었다. 또한 부하지속곡선 분석을 통해 유량 구간별로 수질 목표 초과율을 산정함으로써, 수질 개선을 위한 유효 구간 및 시기를 제시하였다. 본 연구 결과는 남강 유역의 과학적 수질 관리 및 오염저감 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어: 남강댐, 수량-수질 통합모니터링, 오염부하량, 비점오염원, 부하지속곡선

Abstract: This study aims to quantitatively analyze the characteristics of pollutant loads in the upstream region of the Namgang Reservoir using integrated water quantity and quality monitoring data. Automatic measurement equipment was installed at key tributaries to collect hourly data on discharge and total phosphorus (T-P) concentrations. Based on the collected data from 2023 to 2024, daily average pollutant loads were calculated. The results revealed a clear trend of higher pollutant loading during the summer and flood seasons, with the Imcheon site showing the highest loading and delivery rate. Non-point sources accounted for approximately 85% of the total pollutant loads,

First & Corresponding Author: JungKyu Choi, Tel: +82-42-870-7406, E-mail: waterchoi@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0002-7830-1220

Co-Authors: HyungSeok Park, Tel: +82-42-870-7653, E-mail: qwrs07@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0002-6218-1826

HyeSuk Yi, Tel: +82-42-870-7454, E-mail: yihs@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0003-0721-0193

SunA Chong, Tel: +82-42-870-7455, E-mail: jsa@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0003-4422-5546

JiHyun Han, Tel: +82-2-2150-0360, E-mail: jhhan@kwater.or.kr, ORCID: 0009-0009-5128-2283

Received: 15 April, 2025. Revised: 23 June, 2025. Accepted: 11 July, 2025.

emphasizing the need for effective land use and livestock waste management in the watershed. Additionally, a Load Duration Curve (LDC) analysis identified specific flow ranges and periods when water quality standards were exceeded. These findings provide critical baseline data for scientific water quality management and the development of pollution reduction policies in the Namgang watershed.

Keywords: Namgang reservoir, integrated water quantity and quality monitoring, pollutant load, non-point source pollution, load duration curve

I. 서론

국내 수자원은 기후변화와 도시화, 산업활동의 증가로 인해 점차 복잡·다양한 문제에 직면하고 있으며, 강수량의 계절적 편중과 불규칙한 기상 패턴은 안정적인 수량 및 수질관리에 큰 부담을 주고 있다(Kim et al. 2024; IPCC 2023; UNESCO & UN-Water 2020). 특히, 하절기 집중호우 시에는 하천으로 유입하는 비점오염물질의 비증이 급격히 증가하여 댐저수지를 비롯한 수체의 오염을 가중시켜 부영양화를 유발하고, 녹조 발생을 일으키는 원인으로 작용하고 있다(Kim et al. 2019; Liu et al. 2005; Mohammad et al. 2018; Park et al. 2016). 비점오염원의 효율적인 관리를 위하여 비점오염물질의 실측자료 확보 및 추세 파악, 비점오염물질의 정량화 및 유출특성 파악을 위한 비점오염물질측정망이 운영되고 있으며, 이를 통해 정책수립 기초자료 확보 및 저감대책에 대한 효과평가에 활용하고 있다(NIER, 2022). 또한, 8일 간격의 총량 측정 자료 또는 유역모형의 모의값을 활용하여 도식화한 유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC)으로 해당 지점의 유량 및 유출특성을 파악 후, 이를 토대로 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)을 작성하고 하천의 기준부하량 및 목표수질 초과 여부 등을 분석하여 수질 관리를 위한 우선 관리 지역 선정, 목표수질의 평가 등 다양한 분야에 활용하고 있다(Park et al. 2019; Jang et al. 2018; Vogel & Fennessey 1994). Lee et al.(2018(a))은 중점관리가 필요한 심하천 및 오염원을 선별하고자 남한강을 대상으로 FDC와 LDC를 이용하여 갈수기 오염부하 및 기여율을 분석하였으며, Park et al.(2016)은 FDC 및 상관관계 분석을 통해 금호강 유역의 오염원 특성을 파악하고, 점오염원과 비점오염원의 기여율 분석을 통한

중점관리 하천 선정 연구를 수행하였다. Kal et al.(2021)은 유역모형(SWAT)를 이용하여 대청댐 주유지점에 대한 유량과 수질을 모의하고, 부하지속곡선을 작성하여 유황에 따른 수질 변동을 분석하고, 수질 개선 시나리오에 따른 수질 개선 효과를 평가하였다. Lee et al. (2018(b))은 HSPF를 활용하여 모의된 유량 및 수질로부터 일 단위 유량 및 부하지속곡선을 작성하고, 연간 유황변동에 따른 점 및 비점오염원의 배출특성에 따른 유역별 관리방안을 제시하였다. 기존의 연구들은 특정 이벤트 시기의 불포함 가능성이 있는 8일 관측 자료 또는 최대 피크(peak)의 과소·과대 오차를 포함하는 유역모형의 모의값을 활용한 분석으로 분석결과의 정확도를 낮추는 원인으로 작용하고 있다.

본 연구의 대상지역인 남강댐은 조류경보제가 운영 중이며, 빈번한 경보발령으로 안전한 수자원 공급에 어려움을 겪고 있다. 녹조 발생의 주요 인자는 빛, 수온, 영양염류 등이 있으며, 빛과 수온은 자연현상의 결과로 인위적인 조절이 어렵기 때문에 영양염류의 저감을 통한 수질 개선이 녹조 발생을 줄일 수 있는 유일한 방안이다(Ahn et al. 2015). 오염원 조사(2023)에 따르면 남강댐 유역의 T-P 배출부하량은 점과 비점에서 각각 12.3%와 87.7%로서 비점오염물질의 배출이 우세하였다. 이러한 오염원 특성을 가진 유역의 수질개선 대책 수립을 위해서는 유입하는 오염원의 정확한 파악이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 남강댐 상류를 대상으로 국가 측정망으로 운영 중인 유량관측소와 그 인접한 곳에서 운영 중인 수질관측소의 연속된 실측 데이터를 이용하여 유출 및 오염부하 특성을 분석함으로써 우선 관리 지점의 선정 및 향후 수질 개선 대책의 수립시, 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구방법

1. 연구 대상 지역

본 연구의 대상 지역인 남강 유역은 낙동강의 제 1지류에 속해 있으며, 낙동강 유역면적(23,384km²)의 약 14.8%에 해당하는 3,467km²이다. 또한 남강댐은 낙동강 합류점으로부터 80km 상류에 위치하고 있으며, 유역면적은 2,282km²로 주요 유입 하천으로는 남강본류(경호강), 덕천강 및 양천이 있다. 남강댐은 진주시와 사천시의 생·공용수를 각각 10.5만m³/일, 21.0만m³/일을 공급하고 있으나, 하절기 녹조 발생으로 인하여 맑은 물 공급에 어려움을 겪고 있다. 수질관리를 위한 댐 내 수질 측정망은 남강댐 1, 2, 3 지점과 조류경보제 지점인 판문과 내동이 있으며(Figure 1(a)), 물환경정보시

스템에 공개된 물환경측정망의 최근 10년간(2015~2024) 월평균 수질변화 추이를 살펴보면, BOD는 남강댐 1, 2, 3지점에서 각각 1.1~1.6mg/L, 1.0~1.4mg/L, 1.1~1.6mg/L의 범위로 연중 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Figure 1(b)). T-N은 12~4월에 3지점 평균 1.701mg/L로 하절기(6~9월) 평균 1.254mg/L보다 높게 나타났으며 이는 남강댐 주변의 하우스를 이용한 양액재배에 따른 영향으로 판단되나, 정확한 원인의 파악을 위해서는 추가적인 모니터링 및 분석이 필요할 것으로 판단된다(Figure 1(c)). T-P는 7~10월에 0.030mg/L로 11~6월(0.014mg/L)에 비해 2배 이상 높은 농도를 보였으며, 하절기 강우에 의해 댐 상류로부터 유입되는 오염원의 영향으로 판단된다(Figure 1(d)). 남강댐의 Chl- α 는 5월부터 서서히 증가하였고(Figure 2(a)), 유해남조류는 T-

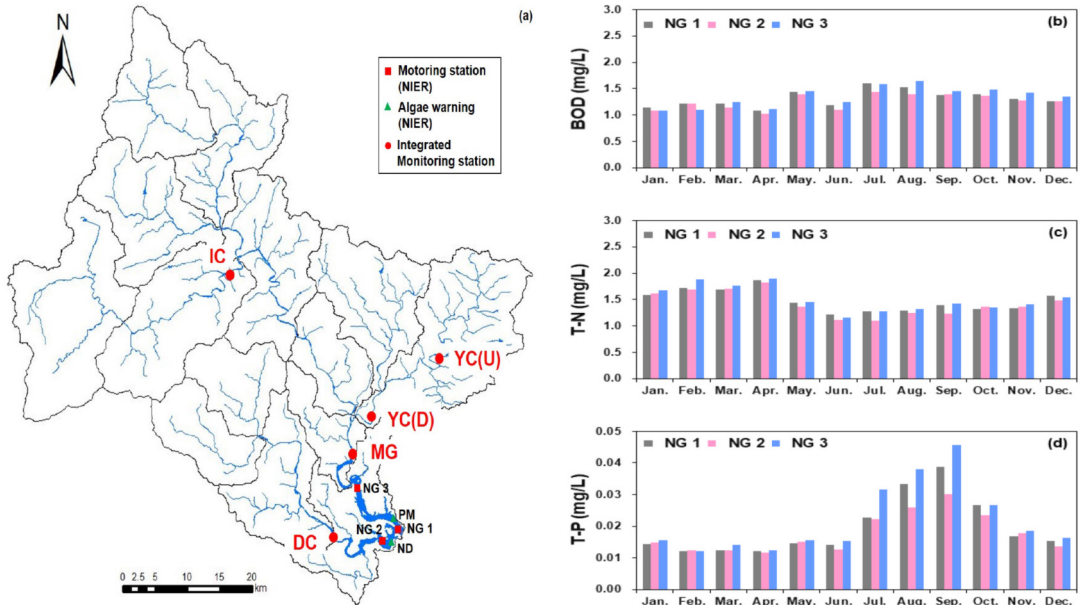


Figure 1. Location of monitoring station (a) and monthly variation of BOD (b), T-N (c), T-P (d) concentrations averaged over 10 years (2015~2024).

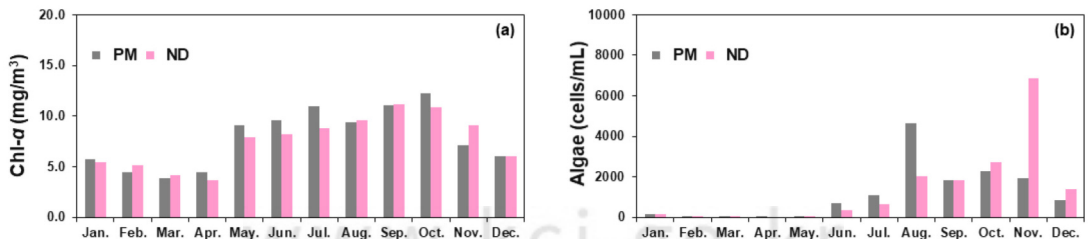


Figure 2. Monthly variation of Chl- α (a), algae abundance (b) averaged over 10 years (2015~2024).

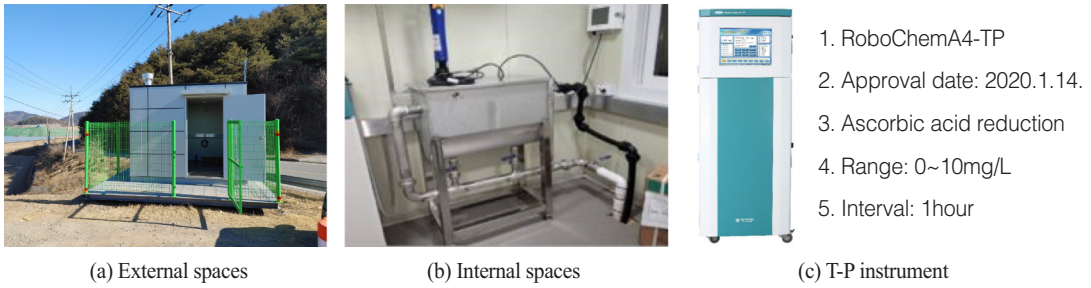


Figure 3. A view of external (a) and internal (b) monitoring station, and T-P auto monitoring systems (c).

P의 변동과 유사한 패턴을 보였으며, 홍수기 이후 수체의 안정화가 이루어지는 8월부터 12월까지 조류의 발생이 유지되었다(Figure 2(b)).

2. 모니터링 및 자료수집

남강댐 상류에 위치한 하천의 수량-수질 연속 모니터링을 위하여 유역면적이 가장 넓은 임천, 축산계 오염원이 산재한 양천(상류, 하류), 본류와 양천이 합류한 이후인 목곡, 제 2지류인 덕천강 하류 등 5개 지점(Figure 1(a))을 선정하여 유량 자료를 확보하였으며, 인접한 지점에 수질관측소를 구축하였다. 수질관측소는 하천의 적정지점에 수중펌프를 설치하고, 3X4m의 가설건축물 내부에 저류수조를 이용하여 T-P 자동 측정장치로 시료를 공급하게 설정하였으며(Figure 3), 시운전 기간(2022년)을 거쳐 2023년부터 본격적인 운영을 시작하였다. 유량 자료는 1시간 간격의 수위 자료와 수위-유량 관계 곡선식을 활용하여 시간 단위 유량을 산출하였고, 수위국에서 관측된 강우량 데이터를 취득하여 데이터 분석에 활용하였다. 부하량 산정을 위한 T-P 자동 측정도 측정 주기를 1시간으로 설정하여 데이터를 취득하였으며, 부하량 평가를 위한 기간은 2023~2024년으로 설정하였다.

3. 부하량 산정 및 평가

수위(유량) 관측소에서 측정된 1시간 간격의 유량 자료와 자동 측정된 T-P 자료로부터 일 평균으로 변환 후, Eq. 1에 의해 유달부하량을 도출하였다. 이렇게 산출된 유달부하량은 국립환경과학원에서 제공하는 발생 및 배출부하량 자료와 비교를 통해 유달률을 산정하였다(Eq. 2).

$$Load (kg/day) = Q_i (m^3/sec) \times C_i (mg/L) \times 86.4 \quad (1)$$

$$Delivery\ ratio = \frac{Load (kg/day)}{Discharged\ load (kg/day)} \quad (2)$$

여기서, Q_i 는 i 번째 유량, C_i 는 i 번째 T-P농도, Discharged load는 해당 유역의 배출부하량이다.

유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC)은 다양한 유량 조건에 대한 장·단기 유량 변화의 분석에 용이하며 (Vogel & Fennessey 1994), 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)은 하천의 목표 수질을 초과하는 유량 구간과 초과 빈도 등에 대한 파악이 쉽고, 목표 수질의 초과 원인을 규명하는데 주로 활용되고 있다(NDEP 2003). 유량지속곡선의 작성을 위한 유량은 시유량자료로부터 일평균 유량(365일)을 산출하였으며, 고유량에서 저유량순으로 정렬한 자료를 0~10%(홍수기), 10~40%(풍수기), 40~60%(평수기), 60~90%(저수기), 90~100%(갈수기)로 유황 범위를 구분하였다. 또한 부하지속곡선을 위한 목표 수질은 모니터링 지점이 남강댐 중권역에 속해 있기 때문에 물환경 목표 기준 Ib(중음)에 해당하는 T-P 농도인 0.04mg/L에 대한 기준부하량을 적용하여 초과율을 검토하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수량-수질 모니터링 결과

연구 대상 기간인 2023~2024년의 실측 유량자료를 이용하여 유량지속곡선을 만들고, 그 결과를 Table 1과 Figure 4에 나타내었다. 유량자료는 홍수통제소에서 제공하는 자료로 별도의 선별 및 이상치 제거 과정을 수행하지 않았다. 2023~2024년의 연평균 강수량은 평균

Table 1. Distribution of flow rates with hydrologic condition between 2023 and 2024.

Contents	Station	MG		DC		YC (U)		YC (D)		IC	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Precipitation (mm)		2,268	1,861	2,349	1,752	1,883	1,525	1,945	1,443	1,683	1,275
High flows (m ³ /s)		488.8	232.6	89.1	50.0	35.1	15.1	121.1	52.6	162.4	76.5
Moist conditions (m ³ /s)		66.3	51.2	16.5	12.8	2.1	2.0	13.2	8.6	18.5	14.3
Mid-range (m ³ /s)		17.7	23.8	4.8	5.3	0.3	0.7	2.6	3.3	5.5	6.4
Dry conditions (m ³ /s)		9.6	15.4	2.5	3.2	0.1	0.3	1.1	2.1	3.5	4.3
Low flows (m ³ /s)		5.0	9.2	1.2	1.8	0.1	0.1	0.3	1.4	1.4	2.7

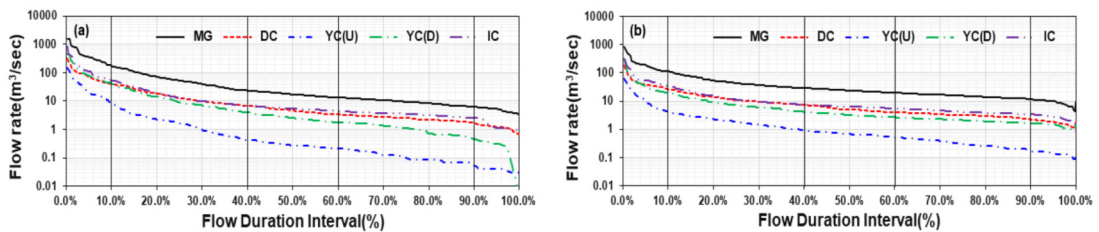


Figure 4. Flow duration curve of Namgang upper stream between 2023 (a) and 2024 (b).

2,026mm(1,683~2,349mm), 1,571mm(1,275~1,861mm)로 2023년의 강수량이 약 1.3배 많았다(Table 1). 또한 유형별 평균 유량은 홍수기에 2배 이상의 높은 값을 보였으나, 평수기 이후에는 유사한 범위 내지 낮은 유량을 나타냈으며(Figure 4), 이는 연간 강수량은 2023년이 많지만, 2024년에 연중 고른 강수 특성으로 인하여 유형에 따른 하천 유량의 변동이 크지 않았기 때문으로 판단된다. 지점별로 살펴보면, 묵곡 지점은 본류(852km²), 임천(482km²), 양천(423km²)이 합류한 이후의 유량이므로 가장 큰 값을 보였고, 유역면적이 가장 작은 양천 상류(106km²)에서 가장 작은 값을 나타냈다.

자동 측정 장비를 사용하여 1시간 간격으로 측정된

T-P 농도를 Figure 5에 나타내었다. 측정된 T-P 자료는 장비 점검 기간과 강수 등을 고려한 선별 과정을 통해 오·결측 및 이상값을 제거하고, 제거된 자료들은 선형 보간을 통하여 1시간 간격의 연속데이터를 구축하여 분석에 활용하였다. 시료의 채수가 유황이 안정된 시기 또는 청천시에 이루어진 물환경측정망 및 자체 수 분석 결과와 비교해 자동 측정 T-P 농도는 모든 유황 조건에서 측정되기 때문에 저농도에서 고농도까지 폭넓은 농도 범위를 보였다. 이처럼 시기와 지점에 따라 수 분석 자료와 차이를 보이나, 장비의 운영과 유지관리가 원활히 이루어진다면 연속데이터의 측정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 연평균 농도는 각

Table 2. Summary of annual and seasonal average T-P concentrations.

Contents	Station	MG		DC		YC (U)		YC (D)		IC	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Spring (mg/L) (Mar.-May)		0.017	0.037	0.023	0.034	0.039	0.044	0.026	0.031	0.032	0.061
Summer (mg/L) (Jun.-Aug.)		0.047	0.066	0.027	0.021	0.050	0.092	0.067	0.074	0.052	0.108
Autumn (mg/L) (Sep.-Nov.)		0.036	0.030	0.021	0.026	0.025	0.037	0.025	0.054	0.046	0.061
Winter (mg/L) (Dec.-Feb.)		0.011	0.024	0.015	0.024	0.021	0.027	0.034	0.047	0.029	0.029
Annual (mg/L)		0.028	0.039	0.022	0.026	0.034	0.050	0.038	0.052	0.043	0.065

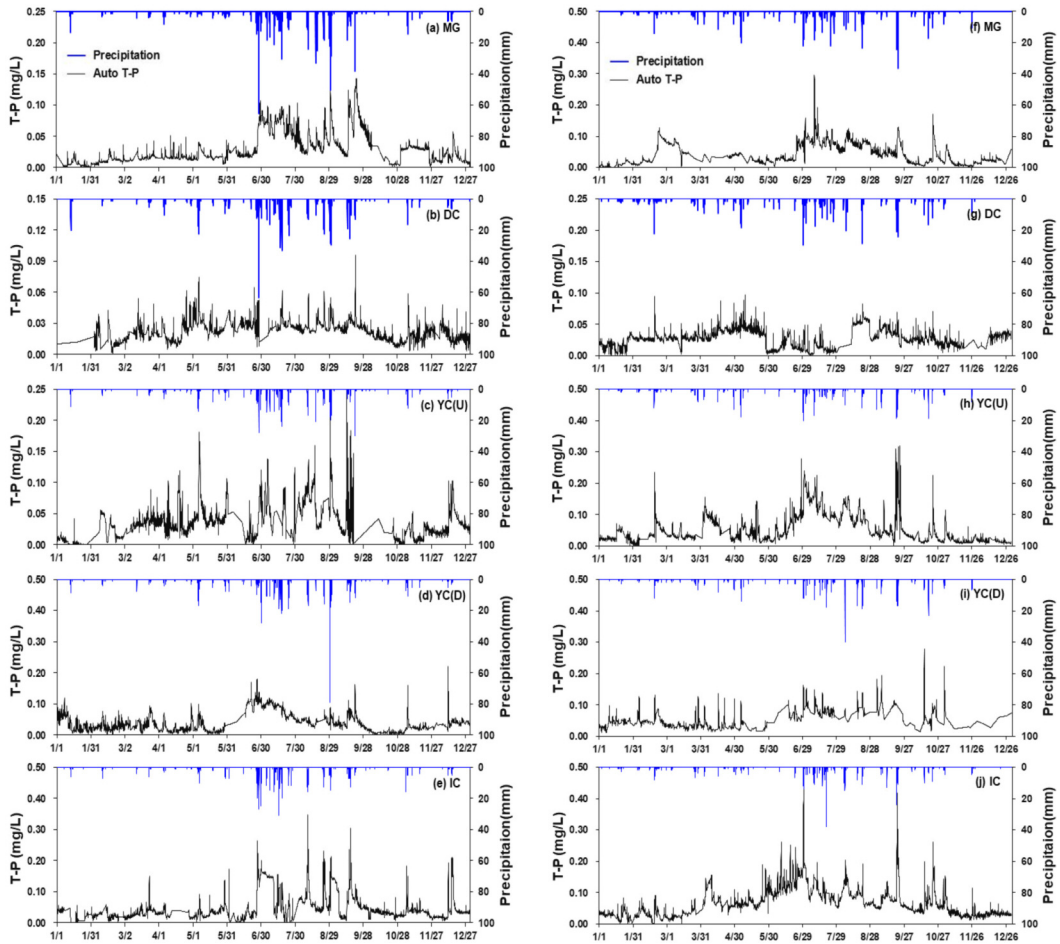


Figure 5. Results of T-P auto monitoring systems during the 2023 (left) and 2024 (right).

각 0.033mg/L(0.022~0.043mg/L), 0.046mg/L(0.026~0.065 mg/L)를 나타냈으며, 계절별로 구분하면 홍수기가 포함된 여름(6~8월)에 가장 높은 농도를 보였으며, 가을(9~11월), 봄(3~5월), 겨울(12~2월)의 순으로 나타났다 (Table 2).

2. 부하량 산정 및 평가 결과

각 지점의 유달부하량 산정에 앞서, 전국 오염원 조사 자료(2023)로부터 행정구역별 배출부하량을 산정하고, 조사지점의 해당구역과 매칭하여 각각의 배출부하량을 산출하였다(Figure 6). 2024년의 배출부하량은 자료 검증 단계로 사용이 불가하여 본 연구에서는 2023년과 같다고 가정하였다. 각 지점에서 산출된 배출부하량은 36.3~293.3kg/day의 범위를 보였으며, 점배출은

생활계에서 대부분을 차지하였으나(Figure 6(b)), 전체 배출부하량의 14.4%에 불과하였다(Figure 6(a)). 반면 비점배출은 전체 배출부하량의 85.6%에 해당하였으며, 토지계 및 축산계의 비율이 매우 높았다(Figure 6(c)). 점배출은 저유량 시기에 하천의 높은 농도를 유발하는 원인이 되고, 비점배출의 비율이 높은 토지계 및 축산계는 강우 영향에 의한 고유량 시기에 하천으로 유입되어 하류 하천 및 댐의 오염부하를 가중시키는 역할을 한다.

1시간간격의 유량과 T-P 자료를 활용하여 일평균 유량과 농도로 변환 후 유달부하량을 산정하였다. 2023년은 지점별로 25.3~211.7kg/day, 2024년은 18.6~119.9kg/day의 범위로 산정되었으며, 인천에서 가장 크고, 양천상류에서 가장 작은 부하량을 보였다(Figure 7(a)). 또한,

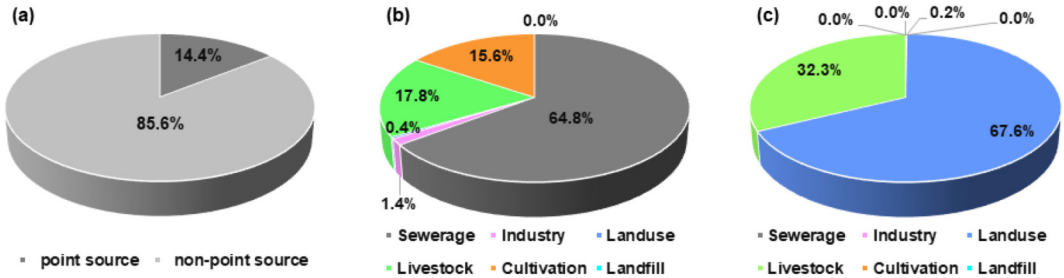


Figure 6. The pollutant ratio (a), discharge load ratio of pollutant source by point source (b) and non-point source (c).

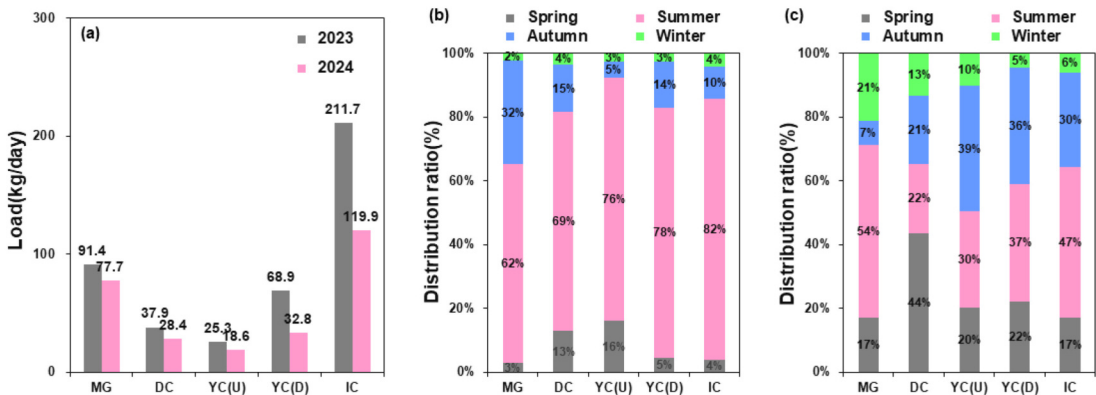


Figure 7. The delivery load (a) and seasonal distribution ratio (b (2023), c (2024)) of each monitoring station.

강수가 하절기에 편중되었던 2023년은 여름과 가을의 부하량이 전체의 81~95%를 차지하였으나, 2024년은 지점별로 다양한 패턴을 보이고, 계절별로 고른 분포의 부하량 유출 특성을 나타냈다(Figure 7(b, c)).

전국 오염원 조사 자료로부터 산정한 배출부하량과 모니터링 자료로부터 산정한 유달부하량을 이용하여 지점별 유달률을 산정한 결과, 2023년은 평균 71.3% (31.1~145.9%), 2024년은 평균 44.8%(26.5~82.6%)이며, 지점별로는 임천 > 양천상류 > 양천하류 > 덕천강 > 묵곡(분류)의 순으로 나타났다(Table 3). 임천은 유역면적 및 배출부하량이 가장 큰 묵곡에 비해 유달부하량이 크고 유달률이 100%를 초과하여 나타났는데, 이는 기저유출에 의한 영향이 큰 경우에 발생할 수 있으며,

정확한 원인의 파악을 위해서는 직접유출 및 기저유출을 고려한 분석(Choi et al. 2014)이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 단위면적당 유달부하량은 2023년 평균 0.222kg/km²·day(0.107~0.439kg/km²·day), 2024년은 평균 0.140kg/km²·day (0.104~0.249kg/km²·day)이며, 임천 > 양천상류 > 양천하류 > 묵곡 > 덕천강의 순으로 높은 값을 보였다. 따라서, 향후 수질개선을 위한 대책을 수립할 경우, 임천이 가장 우선적으로 고려되어야 할 지점으로 판단된다.

본 연구에서는 기존에 수행되었던 총량측정지점의 8일 측정 자료를 활용한 분석 및 유역 모델을 이용한 연간부하량 산정 연구와는 달리, 각 조사지점에 대하여 유량 및 수질을 시간 단위로 측정하고 획득한 자료를

Table 3. Summary of delivery ratio and delivery density during the 2023 and 2024.

Contents	Station	MG		DC		YC (U)		YC (D)		IC	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Delivery ratio (%)		31.1	26.5	40.7	30.5	69.6	51.3	69.1	32.9	145.9	82.6
Delivery density (kg/km ² ·day)		0.107	0.091	0.108	0.081	0.239	0.176	0.217	0.104	0.439	0.249

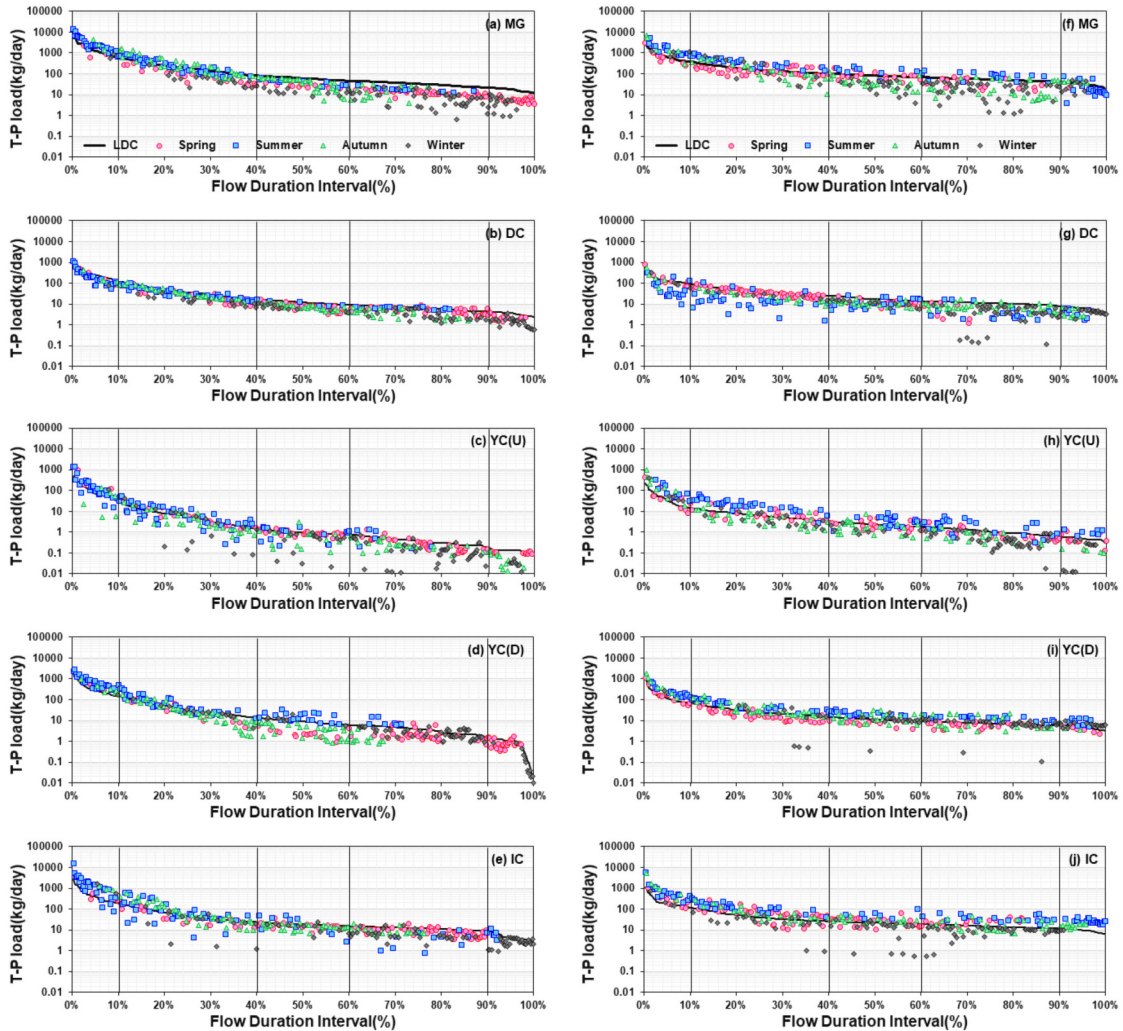


Figure 8. Results of Load Duration Curve during the 2023 (left) and 2024 (right).

Table 4. Exceedance rate of target water quality according to flow conditions between 2023 and 2024.

Contents	Station	MG		DC		YC (U)		YC (D)		IC	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
High flows (%)		89.2	78.4	16.2	29.7	75.7	83.8	100.0	89.2	86.5	86.5
Moist conditions (%)		34.9	48.6	0.9	23.9	45.9	57.8	39.4	56.0	53.2	70.6
Mid-range (%)		0.0	27.0	0.0	13.5	23.3	35.1	30.1	58.1	12.3	55.4
Dry conditions (%)		0.0	22.9	1.8	9.2	15.5	23.9	23.6	57.8	10.9	44.0
Low flows (%)		0.0	35.1	0.0	0.0	5.6	29.7	11.1	70.3	19.4	91.9
Annual (%)		19.5	38.3	2.5	15.6	31.2	42.9	36.2	61.7	32.3	63.4

활용하여 부하지속곡선을 작성하였다(Figure 8). 부하 지속곡선은 목표(기준) 수질을 설정하고, 그에 따른 부하량을 기준으로 대상 지점에서 목표 수질을 초과하는

시기 및 유량 구간을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 0.04mg/L를 수질 목표로 하여 이에 대한 유량 구간 및 계절별 초과

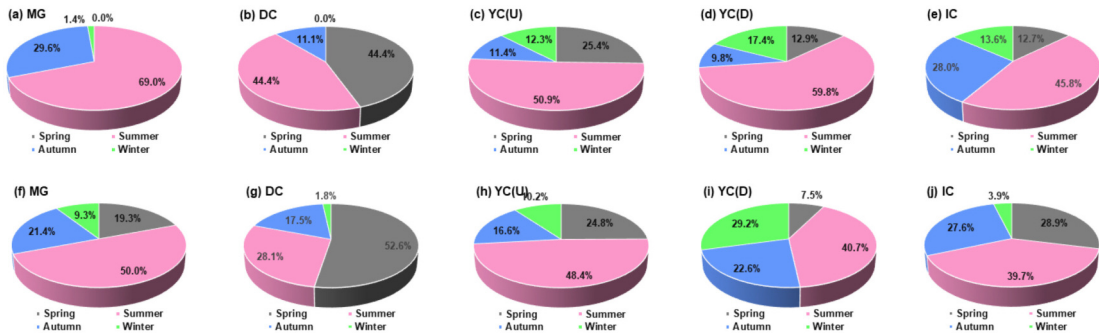


Figure 9. Results of seasonal excess ratio from LDC and standard T-P concentration during the 2023 (top) and 2024 (bottom).

을 분석하였다. 유량 구간에 따른 기준부하량의 초과량은 강수량이 많았던 2023년은 홍수기에 전체 지점 평균 73.5%, 풍수기에 34.9%, 갈수기에는 7.2%를 보였고, 덕천강 지점에서는 0.0~16.2% 범위의 낮은 초과율을 보였다. 또한, 2024년은 전체 기간 평균 31.6~73.5%의 범위로 모든 유량 구간에서 30% 이상의 초과율을 나타냈지만, 덕천강은 2023년과 유사하게 평균값을 하회하는 것으로 분석되었다(Table 4). 덕천강은 물환경측정망의 과거 10개년 평균 T-P 농도도 5지점 중 가장 낮은 0.019mg/L로 다른 지점에 비해 오염도가 낮으며, 배출부하량도 점오염원(32%)의 비율이 다른 지점(10~13%)에 비해 높은 것으로 볼 때, 특정 시기 강우유출에 의한 오염물질의 유입에 따른 영향은 작을 것으로 판단된다.

계절에 따른 목표 수질의 초과는 각 계절의 해당 일수에 대한 초과 일수로 초과율을 산정하였으며, 여름에서 각각 53.0%(2023년)과 75.2%(2024년)으로 가장 높은 초과율을 보였으며, 가을, 봄 및 겨울의 순으로 나타났다(Figure 9). 하지만, 2023년은 2024년에 비해 여름철 강수량이 많았음에도 낮은 초과율을 보였는데, 이는 집중된 연속강우에 의해 오염원의 유하(도달)시간 및 지속시간이 감소하여 낮은 초과율을 보인 것으로 판단된다. 반면, 2024년은 강우강도가 약하여 선형 강우의 영향이 작고, 강우 이벤트마다 지속적인 오염원의 유입으로 인하여 초과율이 높게 나타난 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서는 남강댐 상류에 설치·운영 중인 수량-수질 통합관측소의 연속데이터를 활용하여 T-P에 대한 오염(유달)부하량을 산정하고, 부하지속곡선으로부터 지점별 오염원의 유입특성을 분석하였다. 기존의 연구에서는 유달부하량 산정 및 부하지속곡선 작성을 위해 총량측정망의 8일 간격 자료 또는 유역모델을 사용하여 모의된 유량과 수질농도를 이용하였으나, 본 연구에서는 1시간 간격으로 실측된 유량과 T-P 농도의 활용에 큰 의미가 있다. 또한, T-P 농도는 모니터링 지점과 인접한 국가물환경측정망 자료와 강우 기록을 참고하여 오·결측 및 이상치를 선별·보간 하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

연구대상지역인 남강댐의 총배출부하량(T-P)은 667.6kg/day이고, 점오염원과 비점오염원의 비율은 각각 14.4%와 85.6%로 비점오염원의 배출이 약 6배 많았으며, 묵곡에서 가장 높고, 양천상류에서 가장 작았다. 점오염원은 생활계, 비점오염원은 축산계와 토지계가 대부분을 차지했다. 유달부하량은 강수량이 많았던 2023년에 높았고, 지점별로는 임천 > 묵곡 > 양천하류 > 덕천강 > 양천상류의 순으로 나타났으며, 2023년은 유입량이 큰 여름에 가장 높은 기여율을 보였고, 월별 강수량이 고르게 분포한 2024년은 봄~가을 기간에 걸쳐 고른 오염원의 유입 특성을 보였다. 또한, 유달물과 단위면적당 유달부하량은 임천과 양천 지점에서 높고, 묵곡과 덕천강에서 낮게 나타나 남강댐의 수질관리를 위해서는 댐으로 유입하는 하천보다는 임천과 양천 등 지류의 관리가 중요하다고 판단된다.

2023년과 2024년을 대상으로 연도별 부하지속곡선을 작성하고, 유량 규모 및 계절에 따른 기준부하량의 초과를 살펴본 결과, 홍수기와 풍수기 등 고유량 시기의 초과율이 높게 나타나기 때문에 강우에 의해 유량이 증가하는 시기에 유입하는 비점오염원의 관리가 중요하며, 덕천강은 다른 지점에 비해 점오염원이 비율이 높아 생활계 및 양식계 오염부하량의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 계절에 따른 초과빈도는 여름에 가장 많게 나타났으나, 총강수량과 유입량에 비해하지 않고, 강우강도 및 선행 강우의 영향에 따라 다양한 유입 특성을 보였다.

1시간 간격의 연속된 실측 데이터를 활용하여 오염원의 연간 유입 특성을 분석한 본 연구는 향후 비점오염물질측정망 및 유사한 목적의 측정 데이터 활용성 확대와 연구대상지역의 수질개선을 위한 대책 마련 등에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 향후 장기간의 데이터를 축적하여 다양한 수문사상에 대한 분석과 유역모델(HSPF, SWAT 등)과 연계한 특성 분석 및 수질개선 효과 분석 등이 이루어진다면 남강댐의 수질관리를 위한 최적의 방안이 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미래변화 대응 수자원 안정성 확보 기술개발 사업(과제번호 RS-2024-00332114)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

- 김미은, 장수형, 이기호, 손예주. (2024). 미래 기후변화 시나리오를 반영한 댐의 안정성 분석. *한국기후변화학회지*, 15(5-2), 965-976.
- Kim, M. E., Jang, S. H., Lee, K. H., & Son, Y. J. (2024). Analysis of dam stability based on future climate change scenarios. *Journal of Climate Change Research*, 15(5-2), 965-976. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.5.965>
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). *Climate change 2023: Synthesis Report*. Geneva. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), UN-Water (United Nations Water). (2020). *The United Nations world water development report 2020: Water and climate change*. Paris, France: UNESCO.
- 김성현, 문병현, 송봉근, 박경훈. (2019). 농업지역 소하천의 수질 특성파악을 위한 UAV 영상 활용 가능성 분석. *한국지리정보학회지*, 22(3), 10-20.
- Kim, S. H., Moon, B. H., Song, B. G., & Park, K. H. (2019). An Analysis on the Usability of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Image to Identify Water Quality Characteristics in Agricultural Streams. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 22(3), 10-20. <https://doi.org/10.11108/kagis.2019.22.3.010>
- Liu, G. D., Wu, W. L., & Zhang, J. (2005). Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.11.010>
- Mohammad, N. S., Sajjad, A., & Moses, K. (2018). Climate Change and Eutrophication: A Short Review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(6), 3668-3672.
- 박형석, 윤성완, 정세웅, 황현식. (2016). 소옥천 유역의 오염제어 대책에 따른 대청호 조류저감 효과 분석. *환경영향평가*, 25(4), 248-260.
- Park, H. S., Yoon, S. W., Chung, S. W., & Hwang, H. S. (2016). Effect of Pollutants Control Measures in So-oak Watershed on the Control of Algae Growth in Daecheong Reservoir. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 25(4), 248-260. <http://dx.doi.org/10.14249/eia.2016.25.4.248>
- 국립환경과학원. (2022). 비점오염물질측정망 자료 활

- 용방안 연구.
National Institute of Environmental Research(NIER).
(2022). A Study on the Utilization of Non-point
pollutant Monitoring Networks Data.
- 박현규, 정민혁, 범진아, 최동호, 정재운, 고재한, 김영석,
윤광식. (2019). 비점오염 관리평가를 위한 부
하지속곡선 작성시 모니터링 자료 활용 방안.
한국수처리학회지, 27(4), 43-57
- Park, H. K., Jeung, M. K., Beom, J. A., Choi, D. H., Jung,
J. W., Ko, J. H., Kim, Y. S., & Yoon, K. S. (2019).
LDC Construction Through Water Quality and
Discharge Monitoring for Evaluation of Nonpoint
Source Pollution Management. *Journal of Water
Treatment*, 27(4), 43-57. [http://dx.doi.org/10.17640/
KSWST.2019.27.4.43](http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2019.27.4.43)
- 장선숙, 지현서, 김학관. (2018). 부하지속곡선을 이용
한 비점오염원 우선관리 지역 선정 및 관리목
표 설정 연구. *한국농공학회지*, 60(5), 17-27.
- Jang, S. S., Ji, H. S., & Kim, H. K. (2018). Identifying
Priority Area for Nonpoint Source Pollution
Management and Setting up Load Reduction
Goals using the Load Duration Curve. *Journal of
the Korean Society of Agricultural Engineers*,
60(5), 17-28. [https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.
60.5.17](https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.5.17)
- Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1994). Flow-Duration
Curves. I: New Interpretation and Confidence
Intervals. *Journal of Water Resources Planning
and Management*, 120(4), 485-504. [https://doi.
org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485))
- 이서로, 신재영, 이관재, 성윤수, 김기성, 임경재, 김종진.
(2018(a)). 갈수기 수질 오염부하 특성 및 기여
율 분석: 충주댐 하류 남한강 주요 유입하천을
대상으로. *대한환경공학회지*, 40(6), 247-257
- Lee, S. R., Shin, J. Y., Lee, G. J., Sung, Y. S., Kim, K. S., Lim,
K. J., & Kim, J. G. (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. *Journal of the Korean Society of
Environmental Engineers*, 40(6), 247-257. [https://
doi.org/10.4491/KSEE.2018.40.6.247](https://doi.org/10.4491/KSEE.2018.40.6.247)
- 박경옥, 이창희, 차일권. (2016). FDC 및 상관관계 분석
을 이용한 금호강 유역에서의 오염원추적. *한
국습지학회*, 18(3), 232-243
- Park, K. O., Lee, C. H., & Cha, I. G. (2016). Water Pollution
Source Tracing Using FDC and Correlation Analysis
in Geumho River Basin. *Journal of Wetlands Research*,
18(3), 232-243. [http://dx.doi.org/10.17663/JWR.
2016.18.3.232](http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2016.18.3.232)
- 갈병석, 조소현, 박천동, 문현생, 주용은, 박재범. (2021).
SWAT와 부하지속곡선을 이용한 유역 수질 관
리방안. *한국지리정보학회지*, 24(3), 41-57
- Kal, B. S., Cho, S. H., Park, C. D., Mun, H. S., Joo, Y. E.,
& Park, J. B. (2021). Watershed Water Quality
Management Plan Using SWAT and Load Duration
Curve. *Journal of the Korean Association of Geographic
Information Studies*, 24(3), 41-57. [https://doi.org/
10.11108/kagis.2021.24.3.041](https://doi.org/10.11108/kagis.2021.24.3.041)
- 이은정, 김태근, 금호준. (2018(b)). 오염총량관리제 지
원을 위한 유역모형 기반 유량지속곡선 및 부하
지속곡선 활용방안, *한국물환경학회지*, 34(1),
33-45.
- Lee, E. J., Kim, T. G., & Keum, H. J. (2018). Application
of FDC and LDC using HSPF Model to Support
Total Water Load Management System. *Journal
of Korean Society on Water Environment*, 34(1),
33-45. [https://doi.org/10.15681/KSWE.2017.34.
1.33](https://doi.org/10.15681/KSWE.2017.34.1.33)
- 안치용, 이창수, 최재우, 이상협, 오희목. (2015). 유해남
조류의 세계적 발생현황 및 녹조제어를 위한 질
소와 인-제한 전략. *한국환경생물학회지*, 33(1),
1-6.
- Ahn, C. Y., Lee, C. S., Choi, J. W., Lee, S. H., & Oh, H. M.
(2015). Global Occurrence of Harmful Cyanobacterial
Blooms and N, P-limitation Strategy for Bloom
Control. *Korean Society of Environmental Biology*,
33(1), 1-6. [http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2015.33.](http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2015.33.1.1)

1.001
Nevada Division of Environmental Protection(NDEP).
(2003). Load Duration Curve Methodology for
Assessment and Total Maximum Daily Load
Development, Nevada Division of Environmental
Protection, 1-3.
최윤희, 박운식, 류지철, 이동준, 김용석, 최중대, 임경재.
(2014), 수계별 주요 유량 지점에 대한 강수량과

기저유출 기여도 분석. *한국물환경학회지*, 30(4),
441-451.
Choi, Y. H., Park, Y. S., Ryu, J. C., Lee, D. J., Kim, Y. S.,
Choi, J. D. & Lim, K. J. (2014). Analysis of
Baseflow Contribution to Streamflow at Several
Flow Stations. *Journal of Korean Society on Water
Environment*, 30(4), 441-451.