

남강유역에서의 시설재배지가 본류 수질에 미치는 영향분석

갈병석 · 박재범* · 김성민* · 김현맥* · 신상민* · 전민재* · 이동현*

(주)다온솔루션

*국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Analysis of the Impact of Facility Cultivation Areas on the Water Quality of the Main Stream in the Namgang Basin

Byungseok Ka¹ · Jaebeom Park* · Seongmin Kim* · Hyunmac Kim* · Sangmin Shin* · Minjae Jeon* · Donghyun Lee*

Daon Solution co., Ltd.

*Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received : 08 October 2024, Revised : 11 November 2024, Accepted : 11 November 2024)

요약

본 연구는 낙동강수계 남강 유역에 있는 시설재배 지역으로부터의 장기 수질모니터링 자료를 이용하여 다변량 통계 분석을 통해 낙동강 본류에서의 영향을 분석하였다. 남강 유역은 많은 시설재배가 활발하게 이루어지는 곳으로서 재배에 사용되고 버려지는 폐양액은 하천의 수질에 많은 악영향을 미친다. 다변량 통계분석 결과, 지천의 주요 오염원으로서 유기물질 및 영양물질의 영향이 높게 나타났다. 본류에 대한 지류 영향분석을 위하여 유달부하량을 산정한 결과, T-N과 T-P의 영향이 가장 높게 나타났으며 계절별로 영향이 미치는 항목에 차이가 나타났다. 따라서, 하천에서의 효과적인 수질관리를 위해서는 오염원 및 계절성 등 지류 특성을 고려한 대책이 필요하며 통계기법을 통한 대책은 향후 수질관리에 유용할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 장기 모니터링, 주성분 분석, 요인분석

Abstract

This study analyzed the impact in the main stream of the Nakdong River through multivariate statistical analysis using long-term water quality monitoring data from facility cultivation areas in the Namgang basin of the Nakdong River basin. The Namgang River Basin is a place where many facility cultivation activities are actively carried out, and the waste nutrient solution used for cultivation and discarded has a significant negative impact on the water quality of the river. The results of multivariate statistical analysis showed that organic matter and nutrients had a high impact as the main sources of pollution in the stream. As a result of calculating the tributary load to analyze the impact of tributaries on the main stream, the impact of T-N and T-P was the highest, and there were differences in the items affected by season. Therefore, in order to effectively manage water quality in rivers, measures that take into account tributary characteristics such as pollution sources and seasonality are necessary, and measures using statistical techniques are believed to be useful for water quality management in the future.

Key words : Long-term monitoring, Principal component analysis(PCA), Factor analysis(FA)

*To whom correspondence should be addressed.

Daon Solution co., Ltd.

E-mail : econeural@gmail.com

- Byungseok Kal Daon Solution co., Ltd. / General Manager (kalbs1@naver.com)
- Jaebeom Park Daon Solution co., Ltd. / CEO (econeural@gmail.com)
- Seongmin Kim Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research / Research Officer (frogksm@korea.kr)
- Hyunmac Kim Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research / Researcher (khmc11@korea.kr)
- Sangmin Shin Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research / Research Fellow (clicktomessm@korea.kr)
- Minjae Jeon Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research / Research Fellow (jmin2206@korea.kr)
- Donghyun Lee Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research / Research Fellow (cloudy13@korea.kr)

1. 서론

시설재배란, 유리 온실이나 비닐하우스와 같이 인공시설을 이용하여 인위적으로 재배 환경을 조절하면서 작물을 재배하는 것을 말한다. 시설재배는 다양한 부대장치를 이용하여 재배 환경을 인위적으로 조절할 수 있어 작물 생장에 유리한 환경을 조성할 수 있어 농가의 생산성 향상에 많이 활용하고 있다.

우리나라 경상남도의 시설재배 면적은 2023년 기준 약 11,999 ha로 전국(83,037 ha)의 약 14.5%를 차지하고 있으며 또한, 시설재배 중 양액재배 면적도 전국 2018년 기준 3,355 ha를 차지하고 있어 경상남도는 시설재배와 양액재배가 활발하게 이루어진 곳으로 볼 수 있다(Statistics Korea, 2023). 양액재배는 토양이 없는 상태에서 작물이 자라는데 필요한 양분을 수용액 상태로 공급하는 방법으로서 최근 스마트팜의 도입과 함께 지속해서 증가하는 추세이다. 그러나, 농업 생산력과 토지 효율에 대한 장점이 있으나 재배로 인해 발생하는 폐양액, 폐배지, 폐기작물 등과 이로 인한 하천, 지하수 등의 수질 및 토양오염 등의 우려가 커지고 있다. 또한, 질산태 질소 등 양분의 고농도 유출로 인한 지하수 오염원으로 작용하기도 한다(Ahn et al., 2014). 양액재배로 인한 배출 오염원의 현황을 보면 전라북도 시설재배지에서 배출되는 양액 중 T-N 평균 150 mg/L와 T-P 평균 18 mg/L의 농도는 환경부 배출기준을 각각 4배, 30배 이상 초과하고 있는 것으로 나타났다(Cho, 2017).

이러한 양액재배가 주로 경작되는 지역은 작은 소하천이나 지방하천으로서 하천 본류에 비해 유량이 적어 수질 변동이 크며 유입되는 오염원에 민감한 곳이다. 또한, 수질 측정망이 없는 곳이 많아 정기적인 수질 관리가 어렵다. 지천의 수질 관리가 중요한 이유는 여기서 발생하는 오염원이 하천 본류로 직접 유입되거나 강우로 인한 비점오염원 형태, 토양 침투 후 유출하는 형태, 지하수 유출 형태 등 다양한 경로로 본류에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 소하천에서 유입되는 유량 및 수질은 결국 하천 본류 구간에 영향을 미치는바 해당 자료를 이용하여 하천 본류의 수질 영향을 평가하는 중요한 자료가 된다.

수질 모니터링을 이용한 다변량 통계분석 사례는 국내외 많이 있다. 하천 수질을 평가하는데 활용성이 넓기 때문이다. 통계분석 중에서 주성분 분석(Principal component analysis(PCA))과 요인분석(Factor analysis(FA))은 수질 인자 중에서 해당 유역에서 미치는 영향을 분석하기 위한 평가로 하천 관리를 위한 주 오염원을 도출하는 기초자료로써 활용되고 있다. 국내 적용 사례로는 한강, 영산강, 금강을 대상으로 지역과 계절에 따른 수질 특성 차이를 다변량 통계기법을 이용한 연구가 사례가 있었고(Kim and Lee, 2011; Jung et al., 2012; Lee et al., 2017) 농업용 저수지와 호소에서 수질 특성 분석과 조류 발생 영향 인자분석을 위해 주성분 분석과 군집 분석 등을 적용한 연구가 있었다(Yeon et al., 2011; Choi et al., 2015). 또한, 낙동강수계 전반에 걸친 지류 모니

터링 자료를 이용하여 다변량 분석을 통해 지류의 오염 특성을 분석한 사례도 있었으며(Park et al., 2019) Lee et al.(2022)는 다변량 통계분석을 이용하여 국내 15개 담수호에 대한 수질 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 낙동강수계 지류에서 장기간 측정된 모니터링 자료에 통해 시설재배가 많이 이루어지는 남강 유역 지류에서의 수질을 분석하여 지류에서 유입되는 오염원이 남강 본류에 미치는 영향을 분석하였다. 주 오염원을 검토하기 위해 주성분 분석과 요인분석을 수행하였고 또한, 유달부하량을 산정하여 본류에 미치는 영향을 파악하여 유역 내에서의 지천의 오염 영향을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 수질 모니터링 자료를 이용한 지류 영향분석

본 연구는 Fig. 1.과 같이 크게 3개 분석 단계로 구분된다. 연구 대상 지역에서의 수질을 분석하는 단계와 모니터링하고 있는 지천에서의 주원인이 되는 오염 인자를 찾는 주원인분석과 요인분석 단계, 그리고 본류 수질과 지천 수질과의 관계를 찾는 기여 부분 단계로 구분할 수 있다.

현재 수질 상태를 통해 낙동강 본류로 유입되는 지천의 수질 현황을 확인할 수 있으며 주원인분석과 요인분석은 유입되는 지천에서의 주 오염 인자를 찾는 것이 목적이다. 본류 지점과 유입 지천에서의 수질 간의 상관성 및 유달부하량을 통해 지천에서의 본류 영향을 확인할 수 있다.

2.2 연구 대상 지역 선정

남강 본류 구간은 행정구역상 경상남도로서 서론에서 언급한 바와 같이 시설재배가 많이 이루어지는 지역이다(Fig. 2).

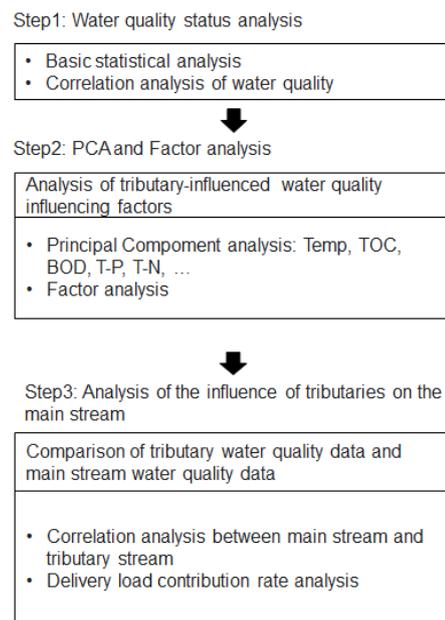


Fig. 1. Analysis flow chart

남강 본류에는 남강1~남강7 까지의 물환경측정망이 운영되고 있으며 최근 10년(2014~2023년)간의 구간별 영양염류 변화율을 분석한 결과, Table 1에서 남강2~남강3 구간에서 T-N과 T-P가 가장 많이 증가하고 있고 남강3~남강4 구간에서 그다음으로 많이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 남강2~남강3 구간은 도시지역에서 생활하수가 환경기초시설을 통해 남강 본류로 직접 유입되는 구간으로서 이에 수질 증가율이 큰 것으로 판단된다. 남강3~남강4 구간의 T-N 변화율은 26.8%로서 남강2~남강3 구간을 제외하면 T-N 등 영양물질 변화율이 가장 높게 나타나며 Chl-a 증가율도 100.45%로서 가장 높다.

남강3~남강4 구간에서 유입되는 지천은 하춘천, 지내천, 향양천, 현지천, 대곡천, 반성천, 상정천, 지수천 8개 하천이 있으며 Table 2에서 하천별 토지

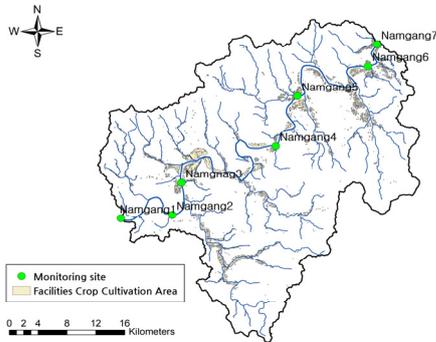


Fig. 2. Namgang Watershed

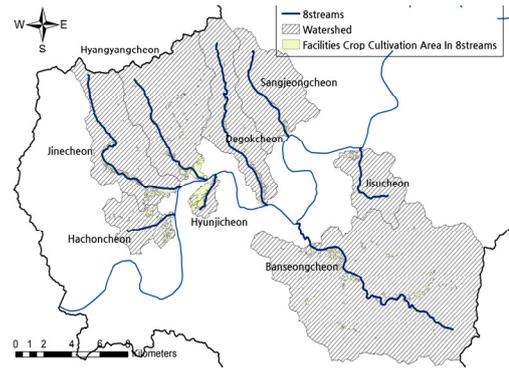


Fig. 3. Target watershed

이용 및 시설재배 면적을 검토한 결과, 8개 하천 총면적 283.27km²의 2.67%로 나타났고 남강 중권역 시설재배 전체 면적 37.12km²의 20.37%로 나타났다.

따라서, 연구 대상 지역은 물환경측정망 남강3~남강4 지점 구간으로 선정하였으며 해당 구간은 남강 유역에서 시설재배지가 많이 분포하고 있고 하수종말처리장이 본류에 직접 유입하지 않아 지천에서의 유량 및 수질 영향을 파악하기에 적절한 곳으로 판단된다(Fig. 3).

2.2 모니터링 현황

낙동강물환경연구소에서는 지난 2011년부터 낙동강 198개 지류·지천에 대하여 중점 관리지점에서는 월 1회, 일반 관리 지점에서는 분기별 1회 유량 및 수질을 측정하고 있다.

Table 1. Water Quality Change Rate (Unit: %)

Site	Chl-a	TOC	T-N	T-P	BOD	EC
Namg.1~Namg.2	-22.16	11.07	0.16	27.56	13.14	-1.15
Namg.2~Namg.3	23.39	7.69	50.19	43.07	29.85	43.41
Namg.3~Namg.4	100.45	10.24	26.98	5.82	6.66	19.79
Namg.4~Namg.5	20.86	-4.61	2.05	0.67	12.73	11.54
Namg.5~Namg.6	31.53	5.21	-3.13	12.47	5.45	-7.91
Namg.6~Namg.7	9.16	11.31	2.70	-6.36	4.62	5.79

Table 2. Tributaries of Landuse area (Unit: km²)

Streams	Field	Rice	Forest	Land	Others	Total Area	Facilities Crop Cultivation Area	Rate(%)
Hachoncheon	3.01	0.37	4.95	1.90	1.99	12.21	0.66	5.39
Jinecheon	5.53	1.37	21.04	0.97	3.84	32.75	1.38	4.22
Hyangyangcheon	7.39	2.22	26.92	0.67	5.51	42.71	1.50	3.52
Hyunjicheon	1.76	0.20	0.87	0.50	0.33	3.67	1.35	36.94
Degokcheon	5.64	2.22	17.34	0.90	2.77	28.86	0.57	1.96
Banseongcheon	16.74	13.24	73.67	4.44	12.15	120.24	1.64	1.36
Sangjeongcheon	2.26	1.36	20.82	0.42	2.09	26.94	0.24	0.89
Jisucheon	1.53	2.04	10.33	0.61	1.37	15.88	0.22	1.37
Summury	43.84	23.02	175.94	10.42	30.05	283.27	7.56	2.67
Namgang mid watershed	182.26	103.75	683.94	62.38	152.75	1,185.08	37.12	3.13

측정되는 자료는 지방하천 및 소하천에서의 수질 및 하천 환경을 관리하는 기초자료로서 중요한 자료이다. 측정되고 있는 자료는 기온, 수온, pH, 유량, 전기전도도, BOD, COD, T-N, T-P, SS, TOC, Chl-a, 분원성 대장균 수, 총 대장균 수이다. 대상 지역에는 하촌천 등 8개 하천이 유입되고 있으며 하촌천은 중점 관리지점이고 나머지 7개 하천은 일반관리지점으로 관리되고 있다. 측정자료는 최근 2014~2024년 6월까지의 자료를 사용하였다.

2.3 주성분 및 요인분석

주성분 분석은 다변량 변수들 사이의 상관관계를 이용하여 변수들의 선형결합으로 표시되는 주성분(Principal component)을 찾는 다변량 통계분석기법이다. 고유치(Eigenvalue)는 주성분이 설명할 수 있는 분산의 크기를 말하며 1보다 크면 하나의 주성분이 변수 1개 이상을 설명할 수 있다는 의미이다. 따라서 고유치가 1 이상인 것을 기준으로 추출한다.

요인분석은 변수들 사이의 연관성을 분석하여 공통으로 포함된 내재 요인(Common factor)을 추출하고 차원을 축소하는 방법으로 상관관계가 높은 변수들을 중심으로 동질적인 요인으로 묶어주는 방법이다. 요인분석을 실행하기 전 자료의 타당성을 알아보기 위해 표본적합도 검증(KMO test, Kaiser Meyer Okkin)과 단위행렬 검증(Bartlett test)을 실행한다. KMO Test는 자료에 대한 변수의 값이 타당성을 나타내는 척도로 1에 가까울수록 타당성이 높고 0.5 이하일 경우에는 타당성이 낮다. Bartlett test는 변수 사이의 상관행렬이 단위행렬인지 아닌지 검증하는 것을 말한다. 요인 패턴의 구조를 단순화하여 요인에 대한 해석을 쉽게 하도록 요인축을 회전하며, 회전하는 방법에는 크게 직교(Orthogonal) 회전과 사각(Oblique) 회전이 있다. 사각 회전은 회전 후 요인들 사이의 상관성을 허용하는 회전이므로 요인들의 의미 파악 및 해석이 쉬운 직교 회전을 일반적으로 적용한다. 직교 회전 방식으로는 Varimax, Quartimax, Equimax, Parsimax과 Orthomax이 있으며 본 연구에서는 Varimax 회전법을 적용하여 분석하였다.

3. 연구 결과

3.1 8개 유입 지천 수질 분석 결과

유입 지천에서의 10년간(2014~2023) 측정된 수질 현황을 분석하였다(Table 3, Fig. 4).

분석 결과, TOC는 유입 지천에서는 3.693mg/L (1.905~5.042 mg/L), 남강3에서는 3.205 mg/L, 남강4에서는 3.267 mg/L로 나타났다. T-N은 유입 지천에서는 3.177 mg/L (1.732~7.624 mg/L), 남강3에서는 1.765 mg/L, 남강4에서는 2.206 mg/L로 나타났다. T-P는 유입 지천에서는 0.116 mg/L(0.046~0.234 mg/L), 남강3에서는 0.036 mg/L, 남강4에서는 0.039 mg/L로 나타났다. BOD는 유입 지천에서는 1.654 mg/L(0.736~2.829 mg/L), 남강3에서는 1.897 mg/L,

남강4에서는 1.909mg/L로 나타났다. EC는 유입 지천에서는 352.68 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (89.32~225.64 $\mu\text{s}/\text{cm}$), 남강3에서는 166.71 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 남강4에서는 192.45 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다.

지천의 수질이 대체로 본류보다 높게 나타나 남강3 지점에서 남강4 지점 구간으로 갈수록 수질이 높아지는 원인으로 지천의 유입으로 볼 수 있다.

3.2 수질의 상관 분석

수질 변수 사이의 상관성을 수행하였으며 그 결과는 아래 Table 4와 같다.

수온은 전기전도도와 음의 상관성을 가지며 다른 항목들과는 양의 상관성을 나타내고 있다.

유기물질인 BOD는 TOC(0.950), T-P(0.944), T-N(0.848), SS(0.826)와 높은 상관관계를 가지고 TOC는 T-P(0.846), SS(0.737)와 높은 상관성을 가지고 있다. SS는 BOD(0.826), T-N(0.882), T-P(0.758)와 높은 상관성을 가지며 T-N은 BOD(0.944), TOC(0.846), T-P(0.867)와 높은 상관성을 가지고 있다.

EC는 물리화학적, 생화학적으로 환경에 영향을 주는 수질 변수로 유기물, 영양염류 관련 수질 변수의 직접적 및 간접적 영향요인으로 판단할 수 있으며 상관성은 상대적으로 낮았다. 수온이 높을수록 유기물질 및 영양물질과 상관성이 높은 것으로 보아 기온이 높은 여름철 유입되는 비점오염원의 영향으로 판단되며 SS와 상관성이 높은 것도 같은 의미로 볼 수 있다.

전기전도도가 수온과 음의 상관성을 보이는 것으로 보아 겨울철은 직접유출보다 기저로 유출되는 오염원이 많아 지하수 영향도 클 것으로 판단된다.

3.3 수질의 주성분 및 요인분석

수질 오염물질 사이의 원인 관계를 파악하기 위해 8개 지천에서의 7항목인 Temp, TOC, BOD, SS, T-N, T-P, EC에 대하여 주성분 분석을 수행하였다.

주성분 분석을 수행하기 전에 자료에 타당성 검토를 위해 KMO test와 Bartlett test를 실행하였다. KMO test는 자료에 대한 변수의 타당성을 나타내는 척도로 1에 가까울수록 타당성이 높고 0.5 이하일 경우에는 타당성이 낮은 것으로 평가하며 본 연구에서는 0.58로 나타났다. Bartlett test는 변수 사이의 상관행렬이 단위행렬인지 아닌지를 검증한다. 변수 사이의 상관성이 높을수록 관계가 유의하며 0에 가까운 값일수록 유의성이 높은 것으로 해석하며 0으로 산정되었다.

주성분 분석에 따른 7개 수질 항목의 고유치와 주성분 요소별 분산을 산정하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 고유치가 1 이상이고 누적 분산 비율 80% 이상을 나타내는 주성분을 오염변동 특성을 설명하기 위한 대상 요인으로 선정하였다. 8개 대상 하천에서 3개의 수질 변동 요인이 추출되었으며 요인1은 68.3%, 요인2는 17.8%, 요인3은 6.3%의 기여율을 나타내고 있다. 3개의 요인은 전체 수질 변동 특성의 92% 이상을 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 3. Water quality status

Site	Value	TOC(mg/L)	T-N(mg/L)	T-P(mg/L)	BOD(mg/L)	EC(μ s/cm)
Namgang3	MAX.	6.500	7.056	0.205	4.600	430
	MIN.	1.600	0.438	0.001	0.400	64
	AVG.	3.205	1.765	0.036	1.897	167
	STDEV.	0.790	1.162	0.031	0.969	72
Hachoncheon	MAX.	9.800	8.932	0.571	7.300	459
	MIN.	2.700	1.535	0.063	0.700	137
	AVG.	4.492	3.965	0.184	2.228	369
	STDEV.	1.333	1.741	0.123	1.341	82
Jinecheon	MAX.	6.400	5.710	0.266	4.100	430
	MIN.	2.100	1.003	0.031	0.600	142
	AVG.	4.077	2.534	0.116	1.823	269
	STDEV.	1.085	1.378	0.057	0.944	80
Hyangyangcheon	MAX.	6.200	5.633	0.194	4.400	386
	MIN.	2.900	0.826	0.025	0.600	124
	AVG.	4.045	2.367	0.081	1.609	226
	STDEV.	0.832	1.269	0.047	0.897	63
Hyunjicheon	MAX.	9.300	28.450	0.919	7.400	752
	MIN.	2.200	1.257	0.047	0.900	75
	AVG.	5.042	7.624	0.234	2.829	391
	STDEV.	1.446	5.348	0.164	1.412	147
Deokgokcheon	MAX.	5.900	3.920	0.153	2.800	1,179
	MIN.	2.400	1.020	0.021	0.500	176
	AVG.	3.555	2.176	0.071	1.345	498
	STDEV.	0.805	0.770	0.037	0.613	257
Banseongcheon	MAX.	7.200	10.800	1.586	5.600	1,107
	MIN.	2.200	0.896	0.018	0.600	164
	AVG.	3.745	2.541	0.144	1.586	433
	STDEV.	1.235	1.970	0.317	1.064	230
Sanjeongcheon	MAX.	3.700	5.094	0.130	2.400	950
	MIN.	0.600	0.900	0.011	0.300	122
	AVG.	1.905	2.477	0.049	0.736	340
	STDEV.	0.851	1.072	0.028	0.446	229
Jisucheon	MAX.	7.300	4.804	0.090	3.000	522
	MIN.	1.000	0.602	0.008	0.400	140
	AVG.	2.686	1.732	0.046	1.077	295
	STDEV.	1.327	0.888	0.022	0.683	97
Namgang4	MAX.	8.000	6.805	0.157	5.400	438
	MIN.	1.700	0.665	0.007	0.500	70
	AVG.	3.267	2.206	0.039	1.909	190
	STDEV.	0.882	1.111	0.021	0.823	69

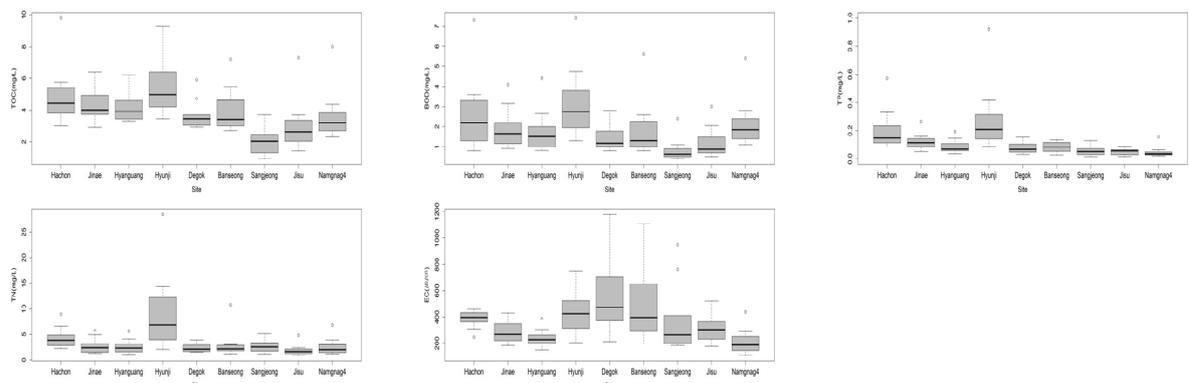


Fig. 4. Water quality status by branch

수질 변수들의 대상 요인에 명확히 할당할 수 있도록 요인 사이의 상관관계를 이용하여 Varimax 회전법을 수행하였으며 해석 결과는 Table 6과 같다.

본 연구에서 BOD, TOC, T-N, T-P, SS는 유기 및 영양물질 요인, 수온은 계절적인 요인, EC는 자연적인 요인으로 구분하여 해석하였다. 또한, 요인부하량의 크기에 따라 강(strong)(>0.75), 중(moderate)($0.75\sim0.5$) 및 약(weak)($0.5\sim0.3$)으로 나누어 요인 부하 해석을 수행하였다(Liu et al., 2003).

요인1은 유기 및 영양물질 요인으로서 강한 양의 요인부하량을 나타내고 있으며 요인2는 자연적 요인의 전기전도도로서 약한 요인부하량을 나타내며 요인3은 기상 및 계절적 요인의 수온으로서 약한 요인부하량을 나타내고 있다. 대상 유역 내 지류·지천은 도시권 하천에 비해 상대적으로 인구밀도

가 낮고 공장과 산업시설이 없는바 유기 및 영양물질은 영농 관련 시설 및 작업으로부터 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 전기전도도의 경우 상관성은 약하나 T-N과 T-P에서 양의 상관성이 나타나고 있어 기저유출의 영향으로 판단되며 수온은 유기 및 영양물질과 양의 상관성을 나타내는바 기온이 높은 여름철 그 영향이 큰 것으로 판단된다.

3.4 본류와 지천 간의 오염원 상관성 분석

유입 지천과 유출지점인 남강4 지점과의 오염원별 상관성을 분석하였다. 상관성 분석 방법은 Pearson 상관계수 방법을 적용하였다. Table 7은 오염물질 간의 상관성 분석 결과이다.

분석 결과, 오염원별 상관성은 TOC, T-N, EC가 T-P와

Table 4. Correlation coefficient matrix of water quality data

Variable	Temp	TOC	BOD	SS	T-N	T-P	EC
Temp	1						
TOC	0.654	1					
BOD	0.636	0.950	1				
SS	0.659	0.737	0.826	1			
T-N	0.531	0.669	0.848	0.882	1		
T-P	0.384	0.846	0.944	0.758	0.867	1	
EC	-0.244	0.085	0.099	-0.007	0.199	0.254	1

Table 5. Initial eigen value and variance for principal component

Component	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
eigenvalue	2.186	1.115	0.663	0.639	0.342
% of Variance	0.683	0.178	0.063	0.058	0.017
Cumulative %	0.683	0.860	0.923	0.982	0.998

Table 6. Rotated factor matrix extracted from principal component analysis

Variable	RC1	RC2	RC3
Temp	0.33	-0.19	0.91
TOC	0.75	0.1	0.53
BOD	0.89	0.07	0.41
SS	0.83	-0.1	0.38
TN	0.91	0.09	0.21
TP	0.95	0.18	0.12
EC	0.11	0.98	-0.12

Table 7. Correlation analysis for each water quality

Site	TOC	T-N	T-P	BOD	EC
Hachoncheon	0.344	0.656	0.474	0.533	0.049
Jinecheon	0.789	0.944	0.652	0.466	0.675
Hyangyangcheon	0.721	0.713	0.570	0.426	0.539
Hyunjicheon	0.203	0.879	0.222	0.387	0.820
Degokcheon	0.228	0.496	0.455	0.512	0.741
Bansungcheon	0.520	0.588	-0.152	0.240	0.597
Sangjungcheon	0.673	-0.255	0.561	0.383	0.680
Jisuchon	0.785	0.484	0.401	0.561	0.361

BOD보다 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 특히 T-N(최대 0.944)과 EC(최대 0.820)의 상관성이 높게 나타나 영양물질과 기저유출 등이 하천 본류에 영향을 미치는 것으로 판단된다. EC로 인한 지하수 영향은 지하수 내 이온 용해도에 의해 영향을 받아 용해된 물질이 지하수를 통해 하천수로 유입되어 전기전도도가 높게 나타나는 것으로 해석된다.

지류별로 상관성을 분석해 보면 TOC는 지내천과향양천, 지수천에서 높은 상관성을 나타내고 있으며 T-N은 지내천과 현지천, T-P는 지내천과 향양천, BOD는 하촌천과 덕곡천, EC는 현지천과 덕곡천에서 높다. T-N은 지내천과 현지천에서 높은 상관성을 보이고 있으며 현지천은 EC 상관계수도 높게 나타나고 있어 지하수 혹은 기저유출을 통한 영향이 남강 본류에도 미친다고 볼 수 있다. T-P는 지내천과 향양천에서 상관성이 높게 나타나고 있으며 TOC와 상관성이 높은 지역에서 높은 상관성을 나타내고 있다. BOD에 대한 상관성이 상대적으로 낮게 나타나고 있는데 남강 본류의 BOD는 지천에서 유입되는 오염원 보다는 상류 하수처리장에서의 방류량에 더 큰 영향이 있으리라 판단된다.

3.5 지류의 유달부하량의 본류에서의 기여율 분석

유달부하량을 분석하여 하천 본류에서의 기여율을 분석하였다. 영향 시기를 파악하기 위해 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)로 구분하여 분석하였으며 유입 지류와 연구지역에서의 남강 본류 말단지점의 남강4 지점에서의 유달부하량을 비교하였다(Table 8~Table 11).

유달부하량을 통한 오염 기여율을 산정하는 것은 유역에서

많이 사용되는 기법으로서 진위천 유역(Cho et al., 2018)과 소양호 유역(Park, 2014), 금호강 유역(Kwon et al., 2016)과 같이 많이 적용하고 있다. 오염원별 분석 결과, TOC는 기여율이 봄철 11.83%로 가장 높고 여름철이 4.13%로 가장 낮게 나타났으며 T-N은 봄철 13.31%로 가장 높게 나타났고 가을철이 5.71%로 낮게 나타났다. T-P는 봄철 24.47%로 높게 나타났고 가을철이 6.17%로 가장 낮게 나타났으며 BOD는 봄철 8.38%로 가장 높게 나타났고 가을철이 3.14%로 가장 낮게 나타났다.

오염원별 기여율은 봄철의 T-P와 T-N이 가장 높게 나타나고 가을과 겨울 가장 낮게 나타났다.

계절별로는 봄철이 8.38~24.47%, 겨울철이 4.31~21.05%의 기여율이 나타나고 여름철 3.36~7.06%, 가을철 3.14~6.17%로 나타나 상대적으로 봄과 겨울철 기여율이 여름과 가을보다 더 큰 것으로 나타났다. 유량이 상대적으로 많은 여름과 가을은 유량이 큰 남강 본류의 상류에서 유입되는 오염원 영향이 큰 것으로 파악되며 유량이 적은 시기에는 본류와 가까운 지천의 영향이 큰 것으로 파악된다.

따라서, 지류로부터 유입되는 오염원을 관리하기 위해서는 봄과 겨울철 시기의 관리가 필요하다.

오염원 중에서는 T-P > T-N > TOC > BOD 순으로 기여가 높게 나타나고 있어 농업 경작 및 가축에서 발생하는 오염원은 지류로부터의 영향이 크고 생활계 영향의 탄소계 유기물질은 환경기초 시설의 방류 등으로 지천에서는 해당 오염 시설이 없으므로 본류 상류로부터의 영향이 큰 것으로 판단된다.

Table 8. TOC Rate of Tributary(Unit: %)

Site	Delivery Load(kg/day)				Rate of Tributary by Namgang4(%)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Hachoncheon	90.07	32.51	31.05	38.60	0.67	0.08	0.14	0.75
Jinecheon	209.41	189.54	185.22	49.20	1.55	0.48	0.81	0.95
Hayangcheon	836.99	137.19	280.27	19.38	6.21	0.34	1.23	0.38
Hyunjicheon	23.47	252.23	67.87	10.73	0.17	0.63	0.30	0.21
Degokcheon	235.59	62.10	142.64	26.32	1.75	0.16	0.62	0.51
Bansungcheon	152.80	775.71	264.59	141.59	1.13	1.94	1.16	2.75
Sangjeongcheon	11.64	145.19	7.29	6.44	0.09	0.36	0.03	0.13
Jisucheon	35.63	53.96	4.31	7.12	0.26	0.14	0.02	0.14
Namgang4	13,486.65	39,887.99	22,841.22	5,154.49	11.83	4.13	4.30	5.81

Table 9. T-N Rate of Tributary(Unit: %)

Site	Delivery Load(kg/day)				Rate of Tributary by Namgang4(%)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Hachoncheon	75.99	20.49	30.00	33.14	0.88	0.14	0.27	0.54
Jinecheon	123.21	51.93	105.43	128.10	1.43	0.36	0.94	2.09
Hayangcheon	615.55	49.11	160.00	16.12	7.13	0.34	1.43	0.26
Hyunjicheon	24.99	128.88	47.82	33.67	0.29	0.90	0.43	0.55
Degokcheon	188.85	31.22	97.20	22.50	2.19	0.22	0.87	0.37
Bansungcheon	62.59	504.50	185.63	164.41	0.73	3.51	1.66	2.69
Sangjeongcheon	17.26	86.02	8.46	8.80	0.20	0.60	0.08	0.14
Jisucheon	40.41	32.95	5.38	8.58	0.47	0.23	0.05	0.14
Namgang4	8,629.72	14,377.99	11,211.38	6,116.07	13.31	6.30	5.71	6.79

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 지류에서의 수질 모니터링 자료를 이용하여 주성분 및 요인분석을 통해 지천에서의 주요 오염원을 평가하고 본류와의 상관성과 유달부하량을 통해 지천에서의 본류 영향을 평가하였다.

대상 지역에서의 유입 하천에서는 기초시설 외 농업 경작 및 축산 등이 주요 오염원으로서 강우 시 발생하는 비점오염원의 영향이 클 것으로 파악된다.

주성분 및 요인분석 결과, 1 요인으로서 유기물 및 영양물질로 나타나 인구밀도가 낮고 산업단지 등이 없는 소규모 지천에서의 특성을 나타내고 있어 비점오염원의 특성을 나타내고 있다. 그러나, 유달부하량을 검토해보면 강우가 많은 여름철보다 봄과 겨울철의 기여율이 높는데, 이것은 본류로 유입되는 유량이 적은 저·갈수기 시기에 지천이 더 큰 영향을 보이는 것으로 판단된다.

지류와 남강 본류 지점 사이의 상관성 분석을 통해 오염원 중 T-N과 EC의 상관성이 높게 나타나고 있어 지류의 영양물질이 본류에 영향을 미치는 것으로 보이며 EC와 상관성이 높은 것은 저수기 시 기저유출 등과 함께 유입되는 것으로 판단된다. 또한, 토지이용 형태로 볼 때 시설경작 면적이 다른 지역보다 넓게 분포되어 있어 시설경작 형태에 따른 오염

원 관리가 필요한 곳이며 최근 생산력 제고를 위한 양액재배가 많이 이루어지고 있어 해당하는 영농에 따른 영향이 클 것으로 판단된다.

따라서, 앞서 얻은 결과를 바탕으로 계절별 구분되는 관리가 필요하며 지류 영향이 큰 겨울철은

시설 경작지로부터 유출되는 오염원이 유역 내 하천에 영향이 적도록 오염수의 지하수 유입 방지 및 하천 유입 방류 시설 개선 등이 필요로 할 것으로 판단된다. 또한, 여름철에는 강우로 인한 경작지에서 발생하는 비점오염원 영향으로 여름철 수질 농도가 높게 나타는바 경작지의 비료와 더불어 시설재배에서의 폐배지, 폐양액 등 비점오염원의 원인되는 오염원 관리도 함께 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 유입 지천에 대한 관리 방향 등을 검토하는데 유용한 자료로 판단되며 향후 시나리오별 저감 대책 등을 통해 본류에서의 수질개선 효과를 통해 관리대책 수립에도 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 낙동강수계관리기금 환경기초조사사업 “낙동강수계 지류·지천 장기 모니터링 및 목표수질 달성도 평가(7차년도)” 연구과제를 통해 수행되었습니다(NIER-2024-05-03-001).

Table 10. T-P Rate of Tributary(Unit: %)

Site	Delivery Load(kg/day)				Rate of Tributary by Namgang4(%)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Hachoncheon	2.55	2.15	1.19	1.05	1.42	0.31	0.25	1.81
Jinecheon	5.54	7.04	5.68	1.40	3.08	1.01	1.17	2.41
Hayangcheon	25.00	4.40	8.28	0.18	13.90	0.63	1.71	0.32
Hyunjicheon	0.99	12.28	3.14	0.44	0.55	1.77	0.65	0.75
Degokcheon	5.66	1.74	3.86	0.44	3.14	0.25	0.80	0.77
Bansungcheon	3.18	17.45	7.30	8.46	1.77	2.51	1.51	14.59
Sangjeongcheon	0.21	2.93	0.22	0.10	0.12	0.42	0.05	0.16
Jisuchon	0.90	1.07	0.17	0.14	0.50	0.15	0.03	0.24
Namgang4	179.93	694.57	483.78	57.94	24.47	7.06	6.17	21.05

Table 11. BOD Rate of Tributary(Unit: %)

Site	Delivery Load(kg/day)				Rate of Tributary by Namgang4(%)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Hachoncheon	46.36	14.15	7.35	25.26	0.50	0.08	0.07	0.77
Jinecheon	93.48	93.16	65.30	19.77	1.00	0.56	0.62	0.60
Hayangcheon	420.91	35.77	115.06	7.70	4.52	0.21	1.10	0.23
Hyunjicheon	14.07	105.37	36.69	7.46	0.15	0.63	0.35	0.23
Degokcheon	134.70	19.31	37.95	9.50	1.45	0.12	0.36	0.29
Bansungcheon	53.76	245.46	61.99	67.83	0.58	1.47	0.59	2.06
Sangjeongcheon	3.85	32.21	1.61	2.01	0.04	0.19	0.02	0.06
Jisuchon	12.46	15.24	2.39	2.59	0.13	0.09	0.02	0.08
Namgang4	9,306.00	16,671.65	10,469.56	3,294.78	8.38	3.36	3.14	4.31

References

- Ahn, T. I., D. Y. Kim, and J. E. Son, 2014. Investigation of colony forming unit (CFU) of microorganisms in the aprika-grown greenhouses using open and closed soilless culture systems. *Horticultural Science and Technology* 32(1): 46–52. doi:10.7235/hort.2014.13103.
- Cho, J. Y., 2017. Development of application technology for reuse of hydroponic waste solution. *Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, and Forestry (IPET)*: 1–5.
- Cho, Y.C., Choi, J.W., Noh, C.W., Kwon, P.S., Kim, S.H., Yu, S.J. 2018, Evaluation of Discharge-Water Quality Characteristics and River Grade Classification of Jinwi River Unit Basin. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 27(6), 704–716. doi: <https://doi.org/10.14249/eia.2018.27.6.704>
- Choi, S.H., Kim, H.D., Lee, T.H., Park, W.I. 2015, Study on Main Factors Affecting Water Quality using a Multivariate Statistical Analysis in the Agricultural Lakes, *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, 22(2), pp.82–97.
- Jung, S.J., Lee, D.J., Hwang, K.S., Lee, K.H., Choi, K.C., Im, S.S., Lee, Y.H., Lee, J.Y., Lim, B.J. 2012, Evaluation of Pollutant Characteristics in Yeongsan River Using Multivariate Analysis. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 45(4): pp.368–377. doi: <http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2012.45.4.368>.
- Kim, Y.Y., Lee, S.J. 2011. Evaluation of Water Quality for the Han River Tributaries Using Multivariate Analysis, *Korean Society of Environmental Engineers*, 33(7), pp.501–510. doi: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2011.33.7.501>
- Kwon, H.G., Na, S.M., Shin, D.S., Im, T.H. 2016, A Study on the Calculation Ratio of Nonpoint Sources in the Gumho Basin, *J. of Korean Society Hazard Mitigation*. 16(4), pp.303–311. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.4.303>
- Liun, C.W., Linn, K.H., Kuon, Y.M. 2003, Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black foot disease area in Taiwan, *Science of The Total Environment*. 313(1–3), pp.77–89. doi: <https://doi.org/10.1016/S0048-9697>
- Lee, Y.J., Park, M.J., Son, J.Y., Park, J.R., Kim, G.D., Hong, C.S., Gu, D.H., Lee, J.G., Noh, C.W., Shin, K.Y., Yu, S.J. 2017, Spatial and Seasonal Water Quality Variations of Han River Tributaries, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 26(6), pp.418–430. doi: <https://doi.org/10.14249/eia.2017.26.6.418>
- Lee, D.H., Kang, E.T., Joo, J.C., Go, H.W., Ahn, C.M., Bae, Y.H., Song, K.D., 2022. Water Quality Analysis and Chl-a Prediction of 15 Large-scale Freshwater Lakes in Korea by Multivariate Statistical Analysis. *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 44(12), pp.589–602. doi: 10.4491/KSEE.2022.44.12.589.
- Park, J.B., Kal, B.S., Kim, S.M., 2019. Application of Multivariate Statistical Techniques to Analyze the Pollution Characteristics of Major Tributaries of the Nakdong River, *Journal of Wetlands Research*, 21(3), 215–223. doi: <https://doi.org/10.17663/JWR.2019.21.3.215>
- Park, S.J., 2014, Evaluation of the Contribution Ratio that the Pollution Loads of the Drainage Areas Affect Soyang-lake, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 15(8), 5363–5368. doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.5363>
- Yeon, I.S., Hong, J.Y., Hong, E.Y., Mun, H.S., Kim, K.H. 2011, Principal Component Analysis of Algal Bloom in Daechong Reservoir, *Proceedings of Spring Conference of the Society of Korean Water Environment*, pp.429–430.
- Statistics Korea(KOSIS) https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0017&vw_cd=MT_ZTI TLE&list_id=K1_15&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTIT LE (accessed Jul. 2024)