

ORIGINAL ARTICLE

낙동강수계 수질의 시·공간적 특성에 대한 통계학적 분석

서미진 · 조창대 · 임태효 · 김상훈 · 윤현정 · 김용석 · 김경훈*

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Statistical Analysis of the Spatio-temporal Water Quality Characteristics of the Nakdong River

Mijin Seo, Changdae Cho, Taehyo Im, Sanghun Kim, Hyunjeong Yoon, Yongseok Kim, Gyeonghoon Kim*

Nakdong River Environment Research Center, Goryeong 40103, Korea

Abstract

Water quality is characterized by various complex factors. Therefore, a systematic understanding of water quality trends is required to carry out a proper evaluation. In this study, we analyzed the spatio-temporal water quality characteristics of the Nakdong River using five-year data from 2012 to 2016. Data was collected on the pH, DO, BOD, COD, SS, TN, TP, TOC, WT, EC, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, Chl-a, rainfall, and total and fecal coliforms. A total of 38 water quality measurement stations, from Andong1 to Gupo, were considered. Statistical analyses including trend, cluster, and factor analyses were conducted to identify the dominant water quality components affecting the Nakdong River. The Nakdong River was spatially classified into three groups for up-stream (Andong1 to Sangju1), mid/up-stream (Donam to Dalseong), and mid/down-stream (Hwawonnaru to Gupo) data collection, and temporally into two groups for summer/fall (7~10), and the rest of the season (11~6) data. The water quality of the entire Nakdong River showed trends similar to the mid/down-stream section, which indicates the importance of water quality management in this section. Suspended solids, phosphorus, and coliform groups were established as important factors to be considered in the summer/fall season across the river, especially in the mid/down-stream section. Nitrogen and organic matter were identified as important factors to be considered in the rest of the season, especially in the mid/up-stream section. This study could help determine the water quality components that should be intensively monitored in the Nakdong River.

Key words : Multivariate analysis, Nakdong River, Spatio-temporal analysis, Trends, Water quality characteristics

1. 서론

낙동강은 도시·농촌지역, 산업·공업단지 등 다양한 점 오염원과 비점오염원으로부터 영향을 받아 왔으며, 분류로 높은 오염 부하(NRERC, 2009; Yu et al., 2012)와

그에 따른 빈번한 부영양화 현상이 언급되어온 하천이다 (Kim, 2005). 이에 국가와 지방자치단체들은 하천환경 개선 대책으로 오염총량관리제를 도입하여 BOD와 TP 항목을 기준으로 지속적인 수질개선에 많은 노력을 기울여 왔다. 하지만 수계는 다양하고 복합적인 요인에 의해

Received 27 June, 2018; Revised 19 December, 2018;

Accepted 26 February, 2019

*Corresponding author: Gyeonghoon Kim, Nakdong River Environment Research Center, Goryeong 40103, Korea
Phone: +82-54-950-9750
E-mail: dahong@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

영향을 받으므로 다양한 수질 항목을 이용하여 변화하는 수질을 평가할 필요가 있다. 특히, 낙동강은 하천을 따라 분포한 많은 산업·공업 단지와 대도시 지역에 의한 공간적 변화가 큰 특징이 있으며, 시간적 변화에 따른 수리·기상학적 특성도 크게 변화하므로 이에 대한 영향을 고려한 수질 평가가 요구된다.

더욱이 낙동강수계는 2012년 8개 보가 분류 200 km 구간에 걸쳐 완공되었으며 수심과 유량 증가 등 물리적 변화를 겪었다. 보 건설에 따른 인위적 방류량 제한은 정체 수역을 형성하며 이화학적, 생물학적 하천 수질의 변화를 초래할 수 있다(Kim et al., 2013). 하천 환경의 변화에 따른 적절한 수질관리를 위해서는 변화시점부터의 모니터링 자료를 이용한 지속적인 수질 변화 파악이 필요하다. 이에 낙동강의 수질을 결정하는 요인을 제대로 파악하기 위해 다변량 분석과 같은 통계적인 분석이 많이 행해져 왔다. 통계분석법을 통해 다양하고 복합적인 수질의 특성을 쉽게 해석할 수 있으며(Lee and Kim, 2007), 정책 제안과 방향설정 등에 대한 의사결정을 보다 효율적으로 할 수 있기 때문이다. 하지만 하천 환경 변화 후의 낙동강 수질 특성 분석 연구는 몇몇에 의해서만 이루어졌다(Gwak and Kim, 2015, 2016; Seo et al., 2016; Jung and Kim, 2017). 또한, 대부분의 연구가 낙동강 일부 또는 한 지점에 대한 분석이었고(Kim et al., 2002; Kim et al., 2007; Kim et al., 2010; Kim et al., 2013), 낙동강 구간 전체에 대한 분석은 미흡했다. Cho (2011)가 낙동강 전체를 대상으로 연구한 바 있지만 상·중·하 구간에 3 지점만을 대상으로 한 연구였다. Park et al.(2010)은 낙동강 분류 12개 지점을 대상으로 했지만 BOD 항목만을 군집으로 분류하였고, 단지 두 지점에 대해서만 강우시와 비강우시의 수질 항목들의 상관 분석을 수행하였다. Kim et al.(2008)은 낙동강 분류 34개 지점에 대해 다변량 분석을 한 바 있지만 주된 영향 인자 도출에 시·공간적 변화를 모두 고려한 연구는 아니었다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 분류 전체를 대상으로 최근 5년간(2012~2016)의 수질 자료를 이용하여 낙동강수계 수질의 시·공간적 특성을 분석하고 군집 분석과 요인 분석의 다변량 통계 기법을 활용하여 시·공간적 수질 결정인자를 도출하고자 하였다. 이러한 연구는 향후 낙동강의 효율적인 수질관리 및 정책개발을 위한 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 지역

강원도 태백산 황지를 발원지로 경상북도와 경상남도를 통과하여 남해로 유입하는 낙동강은 우리나라 남동쪽에 위치하는 제 2의 하천이다. 낙동강은 총 유로 연장이 약 525 km로 가장 길며, 유역 면적은 약 23,384 km²로 전체 국토의 약 25%를 차지한다. 낙동강의 상류에는 반변천, 내성천, 영강, 중류에는 금호강, 황강, 하류에는 남강, 밀양강 등 주요 지류가 합류하고 있으며, 유역 내의 안동, 구미, 대구, 부산 등의 지역에 상수원으로서의 역할을 하고 있는 중요한 수계이다. 낙동강 상류 유역은 대체적으로 임야의 비율이 크며, 주요 대도시와 산업·공업 단지, 환경기초처리시설은 주로 중·하류 유역에 분포한다.

2.2. 자료 수집

본 연구는 2012년부터 2016년까지 총 5년 동안 안동 1부터 구포 지점까지 낙동강 분류 총 38개 측정소를 대상으로 하였다(Fig. 1). 수질 항목은 pH, 용존산소(DO), 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소(TN), 총인(TP), 총유기탄소(TOC), 수온(WT), 전기전도도(EC), 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성질소(NO₃-N), 인산염인(PO₄-P), 클로로필-a(Chl-a), 강우, 총대장균군(Total Coliform; TC), 분원성 대장균군(Fecal Coliform; FC)을 포함하여 총 17개 항목을 고려하였으며, 환경부 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>) 월평균 자료를 이용하였다. 대장균군 항목은 다른 수질 인자와 다르게 기하급수적으로 증가하는 것을 고려하여 일 자료를 바탕으로 기하평균으로 산출된 월평균 자료를 이용하였다. 강우 자료는 낙동강 유역 대표 5지점(상주, 구미, 대구, 합천, 부산)의 월평균 자료를 이용하였다.

2.3. 자료 분석 방법

낙동강수계의 시·공간적 수질 특성을 파악하고 영향 인자를 도출하기 위해 널리 이용되고 있는 계절 맨-켄달(Seasonal Mann-Kendall Test), LOWESS (LOcally WEighted Scatter plot Smoother) 경향 분석과 군집·요인 분석의 다변량 통계 분석을 실시하였다. 계절 맨-켄달 방법은 각 계절에 대한 독립적 켄달 검정 결과의 가중치로 경향성을 도출해내는 방법이며 계절성이 배제되는

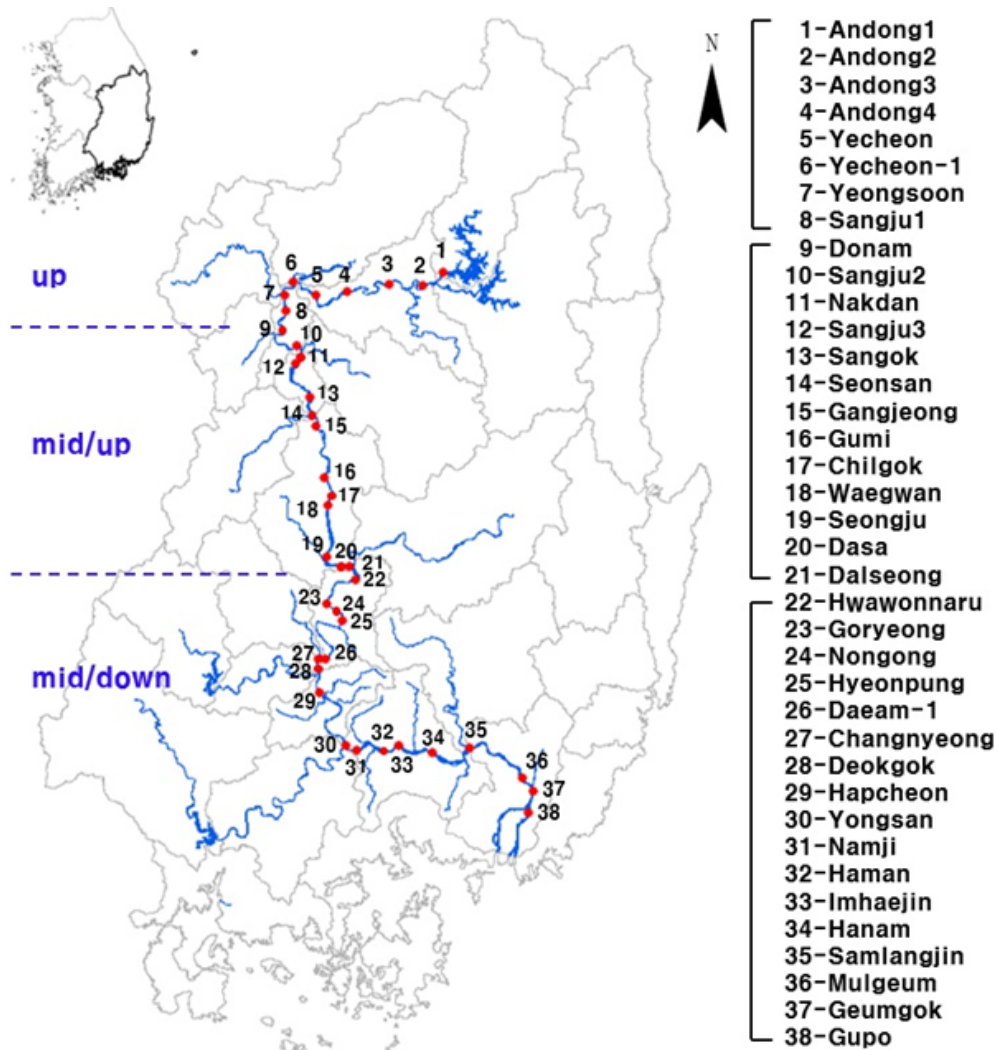


Fig. 1. Water quality measurement stations in the Nakdong River.

방법이다. 경향성은 p-value가 0.05 이상이면 경향성이 없으며 0.05 미만이면 경향성이 있는 것을 의미하며, S는 켄달 통계 추정치로써 양의 값은 증가추세를, 음의 값은 감소추세를 나타낸다. 본 연구에서는 95% 신뢰수준을 적용하여 분석하였다. LOWESS 분석법은 x값에 대한 이동선과 이에 대한 y의 평활값으로부터 가중최소제곱법을 이용하여 직선으로 연결한 분석법이다. 시간의 흐름에 따른 변화 경향성을 알아보기 위해 LOWESS 추세선을 도식화 하였으며, 평활상수 f는 0.5를 적용하였

다.

군집 분석은 데이터의 유사성을 바탕으로 시·공간적으로 동질적인 군집으로 분류하기 위해 순차적으로 군집화가 일어나는 계층적 군집분석을 실행하였다. 군집간 거리는 군집간 정보의 손실을 최소화 할 수 있는 Ward's Method를 이용하였으며, 지점별·시기별 유사성이 높은 집단들로 각각 분류하였다. 요인 분석은 군집 분석 결과를 바탕으로 수질 변수 사이의 복잡한 관계를 축소하여 주요 요인들로 추출하기 위해 실행하였다. 요인 추출은

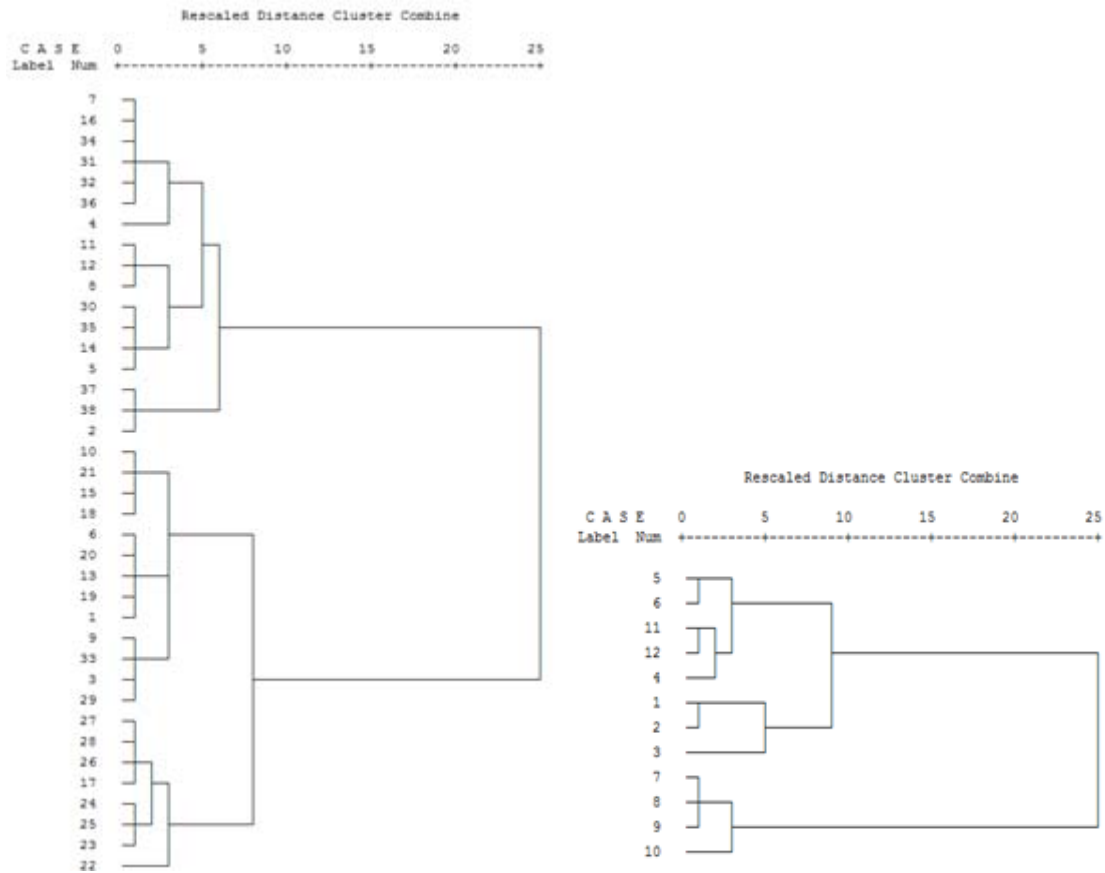


Fig. 2. Dendrogram by spatio-temporal cluster analysis. Left one is the spatial result for water quality measurement stations and right one is the temporal result for months. The numbers of the spatial result indicate the stations in Fig. 1.

주성분 분석(Principal Component Analysis) 방법을 이용하였으며, 요인을 설명하는 분산의 크기를 나타내는 고유값(Eigenvalue)은 1.0 이상의 값만을 고려하였다. 요인 회전은 요인간 상관관계를 0으로 가정하여 요인간 독립성을 유지하며 회전시키는 직각 회전 방법인 Varimax 방법을 적용하였다. 요인 분석 수행시 추출된 요인들에 의해서 변수들을 설명하는 분산을 나타내는 공통성(Communality)의 값은 0.4 미만일 경우 그 변수는 제외하며 분석을 실행하였다. 요인 분석에 사용할 변수들의 수의 적합성 여부를 나타내는 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 검정은 0.5 이상을, 변수의 대각 행렬 여부를 검증하는 Bartlett 검정은 p-value 0.05이하에 대해 분석의 타당성을 판단하였다. 요인 분석 결과로 나타나는 성분

행렬의 요인적재량(Factor Loading)은 0.4 이상의 값을 추출하였다. 자료는 모두 표준화하여 이용하였으며, SPSS(ver. 12.0)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 군집 분석 결과

시·공간적 군집 분석 결과는 지점별로 3군집, 시기별로 2군집으로 분류할 수 있었다(Fig. 2). 공간적 군집 분석은 안동1부터 상주1 지점, 도남부터 달성 지점, 화원나루부터 구포 지점까지 분류되었다. 이러한 공간적 분류는 안동댐하류부터 내성천과 영강 유입 후까지 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 낙동강 상류 구간, 금호강 유입 직전

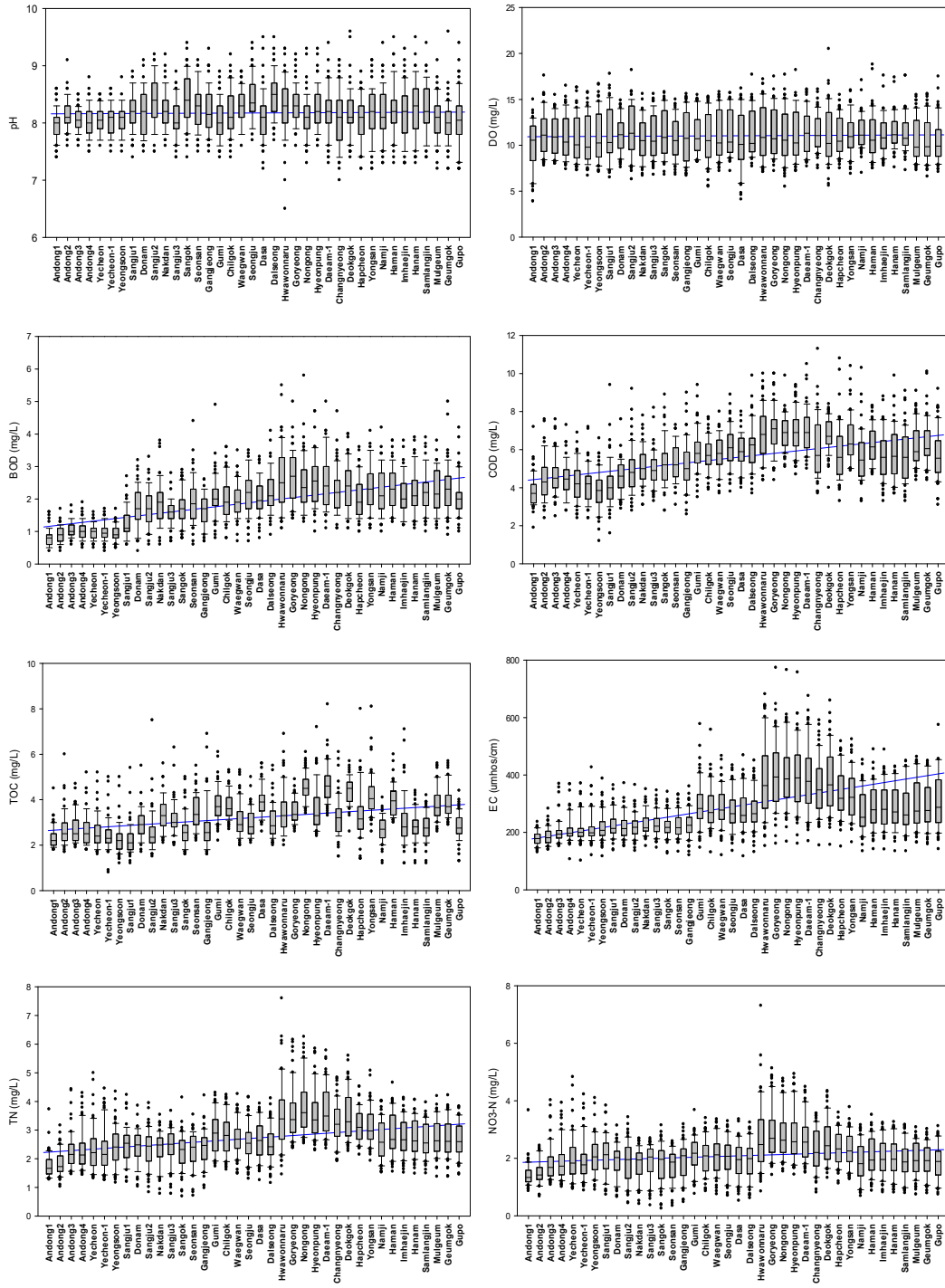


Fig. 3. Spatial water quality distribution with a trend line (blue solid line) from Andong1 (upper station) to Guipo (lower station).

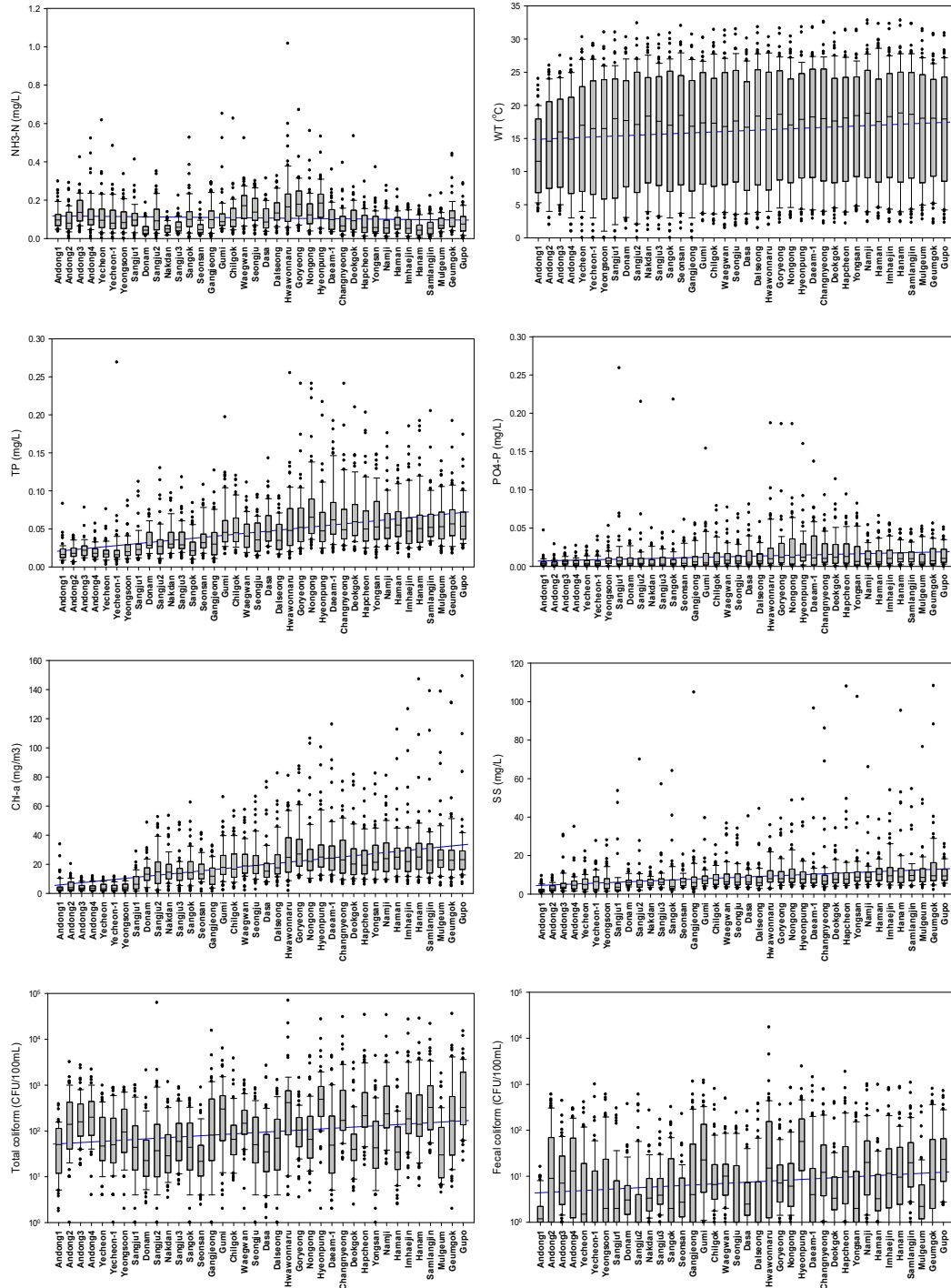


Fig. 3. Continued.

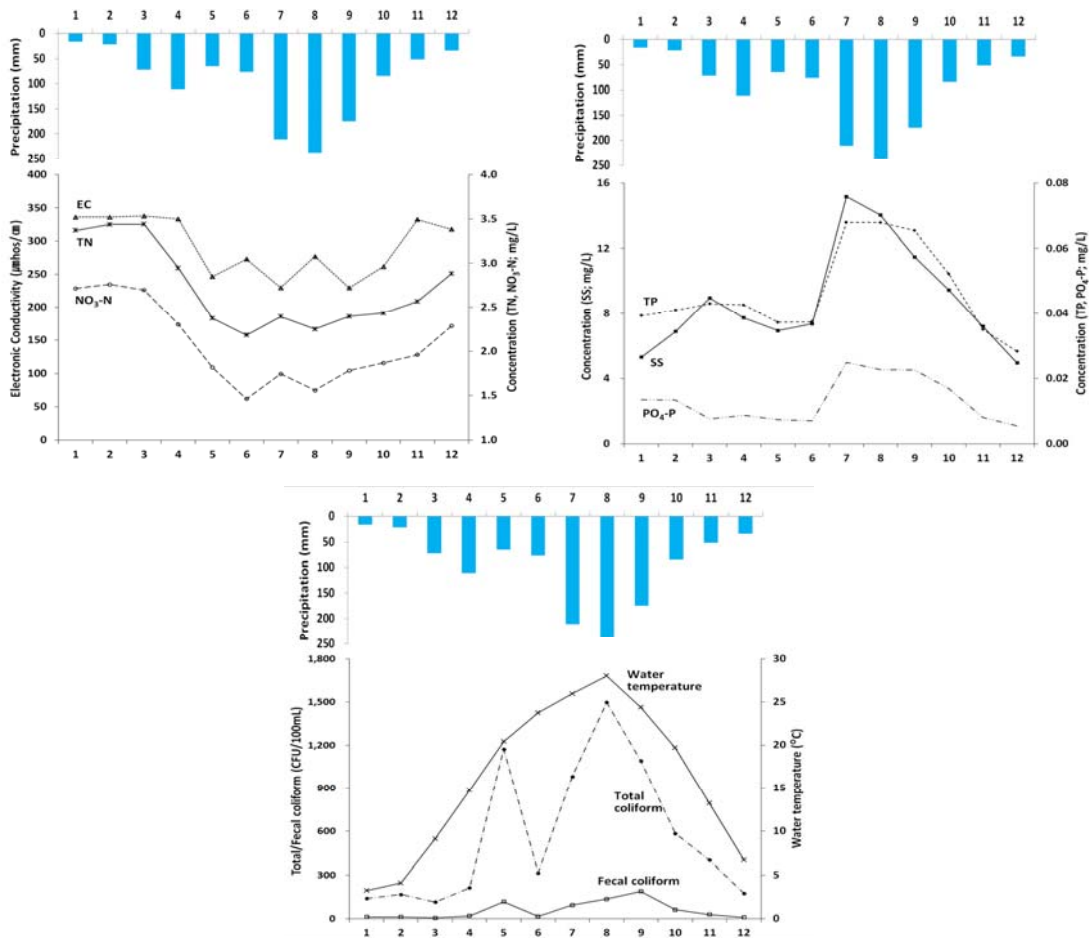


Fig. 4. Temporal trends of 5-year monthly average water quality.

까지 북쪽에서 남쪽으로 흐르는 낙동강 중·상류 구간, 금호강과 남강, 밀양강 등 주요 지류들을 다수 포함하는 낙동강 중·하류 구간으로 낙동강 상류부터 하류까지 흐름에 따른 지점들의 분류였다(Fig. 1). 이는 비슷한 유역 특성 내에 위치하는 측정 지점들 사이에 유사한 수질 특성을 나타내기 때문이며, Kim et al.(2010)과 Park et al.(2010)도 수질 측정소별 가까운 측정소들 사이의 높은 상관성을 언급한 바 있다. 시간적 군집 분석은 강우가 집중된 여름과 초가을을 포함하는 여름/가을철(7~10월)과 그 외 시기(11~6월)로 분류되었다. 이와 같은 시·공간적 분류는 강우, 주요 지류, 오염원의 분포 등 유역 특성과 수리·수문 특성이 반영되어 나타난 결과로 보였다. 군집

분석을 통해 얻어진 결과는 수질 특성 분석과 요인 분석을 위한 시·공간적 분류 집단으로 이용되었다.

3.2. 시·공간적 수질 특성 분석

낙동강 본류의 지점별 수질 현황은 상류 구간이 수질 항목별 농도가 다소 낮았으며, 하류로 갈수록 수질 인자들의 농도와 그 변화 범위가 전반적으로 커지는 경향을 나타냈다(Fig. 3). BOD, COD, TOC의 유기물질 항목들은 하류 방향으로 서서히 증가 경향을 나타냈으며, 질소 계열(TN, NO₃-N)과 EC는 중·하류 구간의 시작 지점인 화원나루 지점을 기점으로 상류와 하류 사이에 뚜렷한 농도 차이를 나타냈다. TP, SS와 Chl-a도 하류 방향으로 갈수록 농도 범위가 뚜렷하게 커졌으며, 기하급수적으로

Table 1. Results of Seasonal Mann-Kendall trend at each stream section

Variable	Upstream			Mid/Up-stream			Mid/Down-stream			Entire stream		
	S	P-value	Trend	S	P-value	Trend	S	P-value	Trend	S	P-value	Trend
BOD	78	< 0.0001	Up	3	0.8316	-	-30	0.0339	Down	-14	0.3222	-
COD	18	0.2031	-	56	< 0.0001	Up	44	0.0019	Up	58	< 0.0001	Up
SS	-50	0.0004	Down	-56	< 0.0001	Down	-65	< 0.0001	Down	-60	< 0.0001	Down
TN	12	0.3961	-	-6	0.6714	-	-26	0.0660	-	-8	0.5716	-
TP	-19	0.1780	-	-55	< 0.0001	Down	-82	< 0.0001	Down	-72	< 0.0001	Down
TOC	24	0.0897	-	53	0.0002	Up	47	0.0009	Up	48	0.0007	Up
WT	56	< 0.0001	Up	20	0.1573	-	24	0.0897	-	28	0.0477	Up
EC	68	< 0.0001	Up	62	< 0.0001	Up	16	0.2579	-	28	0.0477	Up
NO ₃ -N	22	0.1198	-	-10	0.4795	-	-56	< 0.0001	Down	-32	0.0237	Down
PO ₄ -P	23	0.1030	-	-22	0.1198	-	-24	0.0897	-	-24	0.0897	-
Chl-a	54	0.0001	Up	-6	0.6714	-	-26	0.0660	-	-14	0.3222	-
TC	-42	0.0030	Down	12	0.3961	-	46	0.0011	Up	28	0.0477	Up
FC	-18	0.2031	-	-34	0.0162	Down	0	1.0000	-	4	0.7773	-

WT: Water Temperature; TC: Total Coliform; FC: Fecal Coliform

Up-stream: Andong1~Sangju1; Mid/Up-stream: Donam~Dalseong; Mid/Down-stream: Hwawonnaru~Gupo

증가하는 대장균군도 중 하류 구간에서 큰 변화 범위를 나타냈다. 중 하류 구간의 오염도는 전반적으로 상류에 비하여 1.2배 이상 높은 경향을 보였으며, TP는 3배, Chl-a는 5배, 총대장균군은 4배 이상이였다. 낙동강 중 하류 구간에는 금호강, 황강, 남강, 밀양강 등 큰 지류들이 다수 속해 있으며, 상류 지역에 비하여 인구와 산업-공업 단지가 밀집되어 있는 특징이 있다. 이로 인한 하 폐수 등 점오염원의 유입, 유역에 다수 분포되어 있는 농업 지역으로부터의 비점오염원의 유입, 그리고 상류로부터의 오염물질 누적 등 다양한 원인이 중 하류 구간의 높은 오염도를 야기한 것으로 판단된다.

낙동강 전 지점의 5년간 월평균 수질 경향은 질소 계열(TN, NO₃-N)의 오염도가 3월경부터 차차 감소하여 10월경 다시 서서히 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 이는 강우에 의한 유량 증가가 오염물질의 희석에 영향을 미친 것으로 판단되었으며, Kim et al.(2007)의 연구에서도 강우의 오염물질 희석에 의한 강우와 유기물 사이의 음의 상관성을 언급한 바 있다. 지점별 분석과 유사하게 EC는 질소 계열과 같은 경향을 나타내었으며, 이는 EC와 TN의 높은 양의 상관성을 언급한 Gwak and Kim (2015)과 비슷한 결과였다. 반면, TP, PO₄-P, SS는 강

우와 유사한 패턴으로 7월에 급격히 증가하여 서서히 감소하는 경향을 나타냈다. 인 성분은 점토질 토양 또는 토양유기물에 흡착이 쉬우며(Jung et al., 2006) 따라서 SS와 비슷한 패턴을 보이는 것으로 판단되었으며, 강우에 의한 비점오염원의 영향이 주된 원인으로 보였다. 미생물 항목인 총대장균군과 분원성대장균군도 7월부터 9월 사이에 높은 경향을 보였으며, 강우에 의해 비점이 증가하고 수온이 높게 유지되는 기간과 일치하는 경향을 보였다.

낙동강 전 지점의 시간별 월평균 수질은 계절 맨-켄달 검정에 의해 DO, COD, SS, TP, TOC, WT, EC, NO₃-N, TC 항목에서 경향성을 나타냈으며, 이 중 DO, SS, TP, NO₃-N는 시간별 감소 경향을, COD, TOC, WT, EC, TC은 시간별 증가 경향을 드러냈다(Table 1). 특히, DO, SS, TP의 감소 경향과 COD, TOC, EC의 증가 경향은 중 상류 구간과 중 하류 구간에서 공통적으로 나타났으며, 중 하류 구간의 결과는 전 지점의 결과와 매우 유사했다. 이는 오염물질이 누적되는 중류 이하의 구간이 낙동강의 수질을 전반적으로 대변할 수 있음을 의미하는 것으로 보인다. 시간별 COD, TOC의 증가와 SS, TP의 감소 경향에 대해 LOWESS 분석은 2015년 이후

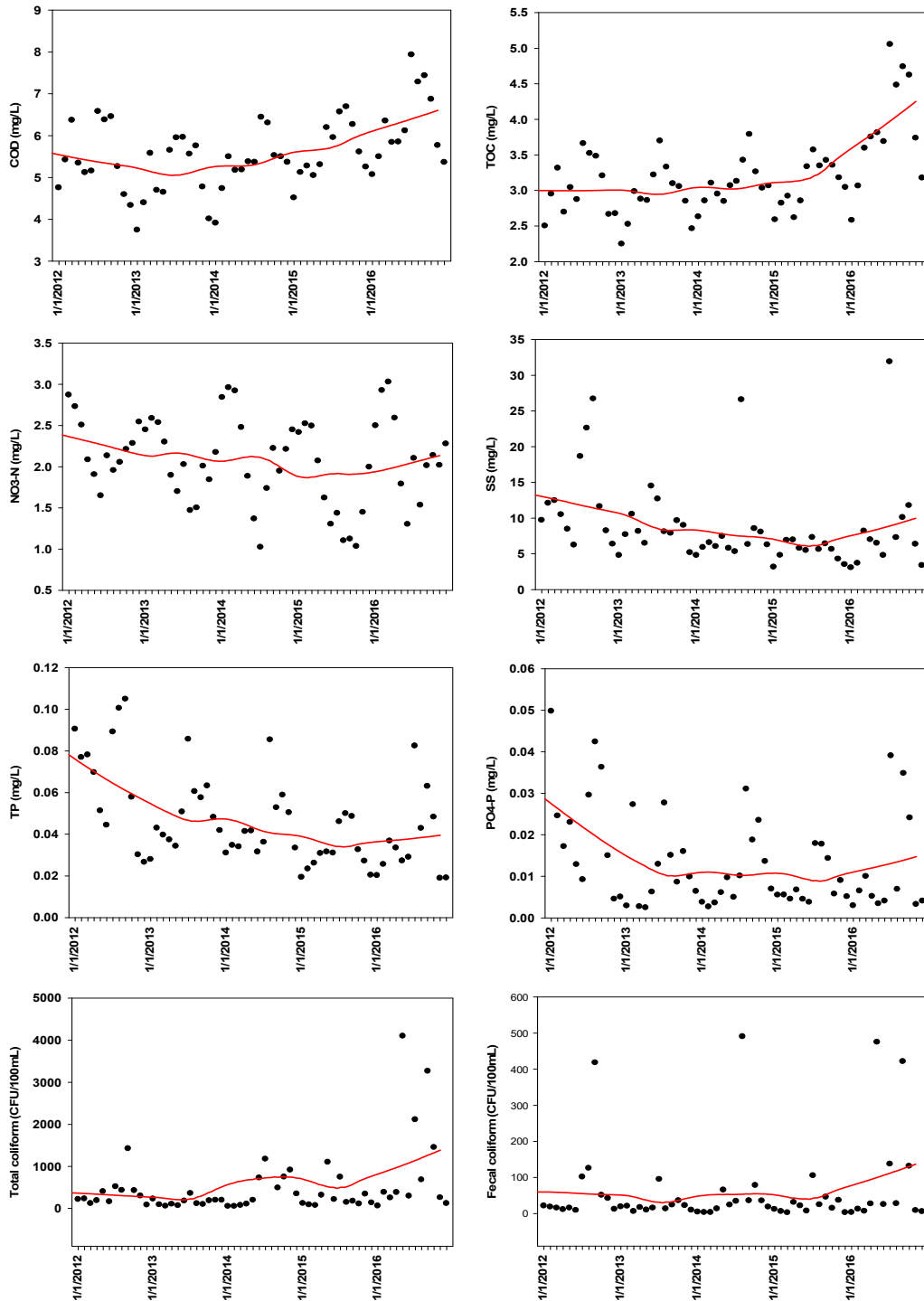


Fig. 5. Temporal LOWESS trends of monthly average water quality (2012~2016).

Table 2. Comparison between weir stations and non-weir stations (stations except for weir stations) at each stream section

Variable	Mid/Up-stream		Mid/Down-stream	
	Weir stations	Non-weir stations	Weir stations	Non-weir stations
pH	8.2	8.3	8.2	8.2
DO	10.8	11.2	11.1	11.1
BOD	1.9	1.9	2.4	2.3
COD	5.3	5.5	6.6	6.2
SS	7.1	8.1	10.6	11.4
TN	2.522	2.511	3.376	3.054
TP	0.043	0.039	0.069	0.061
TOC	3.5	3.0	4.3	3.4
EC	247	253	357	367
NH ₃ -N	0.077	0.124	0.110	0.104
NO ₃ -N	1.901	1.949	2.480	2.257
PO ₄ -P	0.011	0.012	0.019	0.017
Chl-a	17.2	18.6	26.8	27.8
TC	133	409	242	1,093
FC	19	43	34	100

모두 증가 현상을 나타냈다(Fig. 5). TOC의 경우 2015년 중반까지 거의 변화를 나타내지 않다가 그 이후로 급격한 증가를 나타냈으며, 이로 인해 계절 맨-켄달 분석에서 증가 경향에 영향을 미친 것으로 보였다. COD도 2013년 중반 이후로 약간의 증가를 보였지만 2015년 이후로 증가가 점차 심화되어 나타나는 경향을 나타냈다. 반면, 계절 맨-켄달 분석에 의해 감소 경향을 나타낸 비점 수질 항목들과 경향성을 나타내지 않은 수질 항목들도 2015년 이후로 공통적으로 증가 현상을 나타냈다. 오염총량관리제, 비점오염 저감 대책 등 점·비점오염원의 관리가 지속적으로 행해지고 있는 상황에서 오염총량관리제의 목표수질 달성과 본 연구와 같은 점차적인 수질 항목들의 감소 경향 등은 관리가 제대로 이루어지고 있음을 반영한다 할 수 있다. 하지만 기후변화와 보의 건설 등 인위적 영향의 결과가 하천 환경에 변화를 초래할 수 있을 것으로 판단되었다. 기후변화에 따른 강우 패턴은 점차적으로 낮은 빈도의 높은 강우 강도로 변화하고 있으며, 2015년에는 평년 대비 25% 정도 낮은 강수량을, 2016년에는 연간 강수량에 큰 차이를 나타내진 않았지만 높은 강우 강도의 분포를 빈번히 드러냈다. 이런 강우

패턴은 수량이 적은 저·갈수기를 오랫동안 유지하게 하여 수질을 악화시킬 수 있을 것으로 보인다(Kim et al., 2014). 또한, 보의 인위적 방류량 제어에 따른 오염물질 축적의 가능성도 추정해 볼 수 있다. 중·상류 구간에서는 보(5개 지점)와 보 외 지점들의 수질 평균값 비교 결과 보 외 지점들에서 전반적으로 높은 평균값을 보이며 보의 영향을 크게 드러내지 않은 반면, 중·하류 구간에서는 주요 수질 항목들에 대해 보 지점들(3개 지점)에서 더 높은 평균값을 나타냈다(Table 2). 이런 경향은 2015년 이전과 이후 모두에서 나타났으며, 이는 수심이 깊어지고 유속이 느려져 오염물질이 누적되는 중·하류 구간의 영향과 보의 영향이 함께 2015년을 기준으로 전반적인 수질 증가 현상을 발현시킨 것이 아닌지 추정해 볼 수 있었다. 본 연구는 2016년까지를 대상으로 분석하였으며 보 개방이 점차적으로 이루어지고 있는 상황에서 추후 연장된 기간을 대상으로 연구를 확장해 볼 필요성이 있을 것으로 판단되었다.

3.3. 요인 분석 결과

낙동강 본류의 수질 특성을 파악하기 위해 군집 결과를 바탕으로 주성분 분석을 실시한 결과 Table 3~6와

Table 3. Initial eigenvalue and rotation sum of squared loadings at the upstream section

Component	Total period						Summer/Fall season (7~10)						The rest of the season (11~6)					
	Initial eigenvalue			Rotation sum of squared loadings			Initial eigenvalue			Rotation sum of squared loadings			Initial eigenvalue			Rotation sum of squared loadings		
	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)
1	3.507	31.886	31.886	2.680	24.365	24.365	3.466	28.882	28.882	2.483	20.688	20.688	3.160	26.335	26.335	2.616	21.802	21.802
2	2.180	19.815	51.702	2.168	19.709	44.075	2.219	18.492	47.374	2.001	16.677	37.365	1.916	15.969	42.304	2.153	17.943	39.745
3	1.540	14.002	65.703	1.767	16.062	60.137	1.561	13.006	60.380	1.980	16.501	53.866	1.734	14.454	56.758	1.671	13.928	53.674
4	1.098	9.979	75.683	1.710	15.546	75.683	1.125	9.372	69.752	1.731	14.428	68.294	1.219	10.162	66.920	1.546	12.885	66.559
5	.795	7.230	82.913				1.010	8.418	78.170	1.185	9.876	78.170	1.053	8.776	75.696	1.096	9.137	75.696
6	.555	5.044	87.956				.615	5.124	83.294				.876	7.296	82.992			
7	.430	3.912	91.868				.489	4.078	87.372				.614	5.118	88.110			
8	.354	3.214	95.083				.422	3.520	90.892				.510	4.247	92.357			
9	.285	2.594	97.676				.357	2.972	93.864				.352	2.933	95.290			
10	.164	1.489	99.166				.273	2.278	96.142				.308	2.570	97.859			
11	.092	.834	100.00				.244	2.031	98.173				.178	1.480	99.339			
12							.219	1.827	100.00				.079	.661	100.00			

Table 4. Initial eigenvalue and rotation sum of squared loadings at the mid/up-stream section

Component	Total period						Summer/Fall season (7~10)						The rest of the season (11~6)					
	Initial eigenvalue			Rotation sum of squared loadings			Initial eigenvalue			Rotation sum of squared loadings			Initial eigenvalue			Rotation sum of squared loadings		
	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)	Total	Variance (%)	Cumulative (%)
1	3.743	28.793	28.793	3.299	25.374	25.374	4.683	39.028	39.028	3.571	29.754	29.754	3.836	23.976	23.976	3.421	21.383	21.383
2	2.674	20.568	49.361	3.011	23.159	48.533	1.910	15.918	54.946	2.023	16.858	46.613	3.072	19.202	43.179	3.131	19.568	40.951
3	1.799	13.838	63.199	1.816	13.969	62.502	1.466	12.216	67.162	1.921	16.010	62.622	2.224	13.902	57.081	1.901	11.883	52.834
4	1.398	10.756	73.955	1.489	11.453	73.955	1.147	9.558	76.720	1.692	14.097	76.720	1.628	10.172	67.253	1.827	11.418	64.252
5	.983	7.558	81.512				.891	7.428	84.148				1.154	7.209	74.463	1.634	10.210	74.463
6	.615	4.730	86.243				.509	4.244	88.392				.931	5.820	80.283			
7	.545	4.193	90.436				.476	3.970	92.362				.754	4.711	84.994			
8	.420	3.230	93.666				.386	3.218	95.580				.565	3.529	88.523			
9	.273	2.098	95.764				.242	2.015	97.595				.446	2.789	91.312			
10	.241	1.854	97.619				.152	1.269	98.864				.367	2.295	93.607			
11	.184	1.418	99.037				.108	.897	99.761				.308	1.925	95.533			
12	.072	.553	99.590				.029	.239	100.00				.256	1.601	97.133			
13	.053	.410	100.00										.190	1.188	98.321			
14													.135	.842	99.163			
15													.074	.465	99.629			
16													.059	.371	100.00			

Table 6. Results of rotated component matrix by factor analysis

Section	Period	KMO	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
Up-stream	Total period	0.663	TP, SS, DO, WT, Rain	TN, NO ₃ -N	BOD, Chl-a	TC, FC	
	Summer/Fall season (7~10)	0.676	TN, TP, PO ₄ -P, SS	TC, FC	BOD, COD, Chl-a	pH, DO	WT
	The rest of the season (11~6)	0.607	EC, TN, NO ₃ -N	DO, WT, Rain	TC, FC	COD, TOC	pH, NH ₃ -N
Mid/Up-stream	Total period	0.662	TN, NO ₃ -N, DO, WT	TP, PO ₄ -P, SS, TC, FC	BOD, Chl-a	EC, NH ₃ -N	
	Summer/Fall season (7~10)	0.676	EC, TN, NO ₃ -N, TP, PO ₄ -P, SS	TC, FC	COD, TOC	Chl-a, DO	
	The rest of the season (11~6)	0.657	TN, NO ₃ -N, DO, WT	pH, BOD, COD, TOC, Chl-a	TP, PO ₄ -P, SS	TC, FC	EC, NH ₃ -N
Mid/Down-stream	Total period	0.744	TP, PO ₄ -P, SS, Rain, TC, FC	TN, NO ₃ -N, DO, WT	pH, BOD, Chl-a	COD, TOC	
	Summer/Fall season (7~10)	0.685	TP, PO ₄ -P, SS, Rain, TC, FC	TN, NO ₃ -N	BOD, COD, TOC	NH ₃ -N, DO	
	The rest of the season (11~6)	0.681	TN, NO ₃ -N, DO, WT	BOD, Chl-a, SS	COD, TOC, NH ₃ -N	TP, PO ₄ -P	TC, FC

KMO: Kaiser-Meyer-Olkin; WT: Water Temperature; TC: Total Coliform; FC: Fecal Coliform

Up-stream: Andong1~Sangju1; Mid/Up-stream: Donam~Dalseong; Mid/Down-stream: Hwawonnaru~Gupo

같이 나타났다. 요인 분석 모형에 대한 KMO 검정 결과 모든 결과치가 0.5 이상을 나타냈으며, Bartlett 검정의 p-value도 모두 0.05 이하를 나타내며 요인 분석의 타당성을 드러냈다. 고유값 1.0 이상을 나타내는 요인은 낙동강 본류 구간별로 전 시기에 대해 모두 4개 요인이 추출되었으며, 시기별로는 상류에서 여름/가을철과 그 외 시기에 5개 요인, 중·상류와 중·하류에서 여름/가을철에 4개 요인, 그 외 시기에 5개 요인이 각각 추출되었다(Table 3~5). 요인의 누적기여율은 모든 경우에 제 1 요인이 20% 이상의 설명력을 나타내며 총 70% 이상의 높은 설명력을 나타냈다. Varimax 회전을 통한 성분 행렬의 결과 낙동강 본류의 수질이 전체적으로 영양염류와

유기물질에 의해 결정됨을 보여주었다(Table 6). 영양염류가 제 1,2 요인으로, 유기물질이 제 3,4 요인으로 나타났다. 중·상류와 중·하류 구간에는 대장균군 항목이 인계열 항목과 함께 제 1,2 요인으로 크게 영향을 끼치고 있는 것으로 나타났다.

시기별 본류의 수질은 여름/가을철 외 시기(11~6월)에 상류부터 하류 전 구간에 공통적으로 질소 계열(TN, NO₃-N) 항목이 제 1 요인으로써 영향력 있는 수질 항목으로 추출되었다(Table 6). 이는 Fig. 4의 월별 질소의 경향과 유사한 결과였으며, 강우에 의한 비점보다 점오염원에 의한 영향을 크게 받기 때문으로 판단되었다. 낙동강은 하천을 따라 많은 산업·공업 단지가 분포하고

있으며, 특히 중·상류 지역에는 구미, 왜관 공단 등 대규모 단지가 존재한다. 금호강 유역은 하수처리장의 방류수가 금호강 하류 하천유지수량의 40% 이상을 차지할 만큼 하수처리장 영양염류의 낙동강 본류에 대한 영향이 언급되어 왔다(Jeon, 2012; Jung et al., 2016; Jung and Kim, 2017). 조류 발생 정도를 나타내는 Chl-a와 유기성 오염물질인 BOD, COD, TOC가 제 2,3 요인으로 중·상류와 중·하류 구간에 공통적으로 나타난 것도 이러한 점오염원의 영향이 크다는 것을 증명하는 것으로 보였다(Table 6). 하수처리장 방류수 또는 불명수 등 인위적 점오염원에 의한 외래성 유기물의 유입은 Chl-a의 성장을 촉진하며, 증가된 Chl-a 역시 자생유기물로 외래성 유기물과 자생유기물의 증가(Kim et al., 2008)는 TOC의 증가로 이어질 수 있을 것으로 보였다. Kim and Lee (2001)도 식물플랑크톤의 증식에 따른 BOD, COD의 증가를 언급한 바 있다. 이와 같이 유기성 오염물질과 질소 계열의 영향력은 여름/가을철 외 시기 동안의 점오염원 관리의 필요성을 드러내며, 특히, 전 시기의 제 1 요인의 결과와 동일한 결과를 나타낸 중·상류 구간에서 관리의 필요성이 부각되었다.

여름/가을철 시기(7~10월)에는 영양염류, 부유물질, 대장균군 항목이 제 1,2 요인으로 상류부터 하류 전 구간에 걸쳐 공통적으로 추출되었으며, 부유물질(SS)과 인 계열(TP, PO₄-P)의 항목이 제 1 요인으로 추출되었다(Table 6). 이런 결과는 낙동강 중·하류에 위치한 4개 보를 대상으로 요인 분석을 실시한 결과 계절에 상관없이 TN, NO₃-N, DO, WT를 제 1 요인으로, 여름철에는 EC, SS, TP, PO₄-P를 제 1 요인으로 추출한 Jung and Kim(2017)의 연구와도 비슷한 결과였다. 낙동강 유역의 경우 상류 지역은 임야가 큰 비중을 차지하며, 중류 이남에는 대도시 지역과 대단위 농경 지역의 영향권에 있는 큰 지류들이 본류로 다수 유입하고 있다. 유입 지천 중 유로 연장과 유역 면적이 두 번째로 큰 금호강 유역은 높은 농경지 비율로 본류로의 높은 영양염류 유입이 언급되어 왔다(Jung et al., 2016). Lee(2015)도 남강댐 하류 하천 주변으로 축산 농가와 공업 지역 등이 다수 분포되어 있어 본류로의 오염물질 유입이 낙동강 하류에 미치는 영향을 언급한 바 있다. 연구기간 동안의 7~10월의 월평균 강우는 전체 강우량의 60% 이상을 차지하며, 본 연구 결과는 여름/가을철 집중된 강우로 인한 비점오염원의 본

류로의 유입이 증가함에 따른 결과로 판단되었다(Park et al., 2014). 또한, 여름철 높은 수온에 의해 침전되어 있던 PO₄-P 용출의 증가도 이유가 될 수 있을 것으로 보였다(Min et al., 2011).

특히, 상류, 중·상류 구간에 대장균군이 제 2 요인, 중·하류 구간에 제 1 요인으로 추출되면서 부유물질, 영양염류, 특히 인과 함께 여름/가을철 중요한 변수로 작용하고 있는 수질 항목임을 알 수 있었다(Table 6). 대장균군은 상수에서 중요한 병원성 미생물 오염 지표로, 여름철 증가된 수온과 그 온도가 유지되는 가을 시기까지 공급된 영양물질 하에 증식하여 수체에 문제를 야기한 것으로 보였다. Ramteke et al.(1992)과 Baek(2014)은 대장균군 발생에 수온 증가의 영향을 언급한 바 있으며, 많은 연구들이 대장균군과 유기물질 농도와의 정의 상관성을 나타낸 바 있다(Arai and Ikejima, 1980; Hiraishi, 1984; Araujo et al., 1989; Canosa and Pinilla, 1999; Beck and Sohn, 2006). 유기성 오염물질인 BOD, COD, TOC가 제 3 요인으로 추출된 것도 대장균군과의 정의 상관관계로 설명될 수 있을 것으로 보였다(Table 6). 특히, COD는 여름/가을철 전 구간에 공통적으로 추출되었으며, Kim et al.(2004)과 Park et al.(2010)은 강우시 수질 인자들의 상관 분석 결과 COD와 SS, COD와 TP 사이에 높은 상관성을 밝힌 바 있다. 인과 부유물질의 영향을 제 1 요인으로 가장 크게 받는 여름/가을철에 이러한 현상이 나타난 것으로 판단되었다.

여름/가을철 시기의 연구 결과로부터 강우 시기에는 비점 오염물질들(제 1,2 요인)과 유기성 오염물질들(제 3 요인)이 상·중·하류 구간에 유사하게 영향력을 나타냄을 알 수 있었다. 이를 통해 경향 분석으로부터 비점 수질 항목인 SS와 TP가 시간별 감소 경향을 나타냈을 지라도 여름/가을철 시기에는 비점오염원의 관리와 그 영향을 최소화할 수 있는 대책 마련이 필요함을 여실히 드러냈다고 볼 수 있다. 또한, 여름/가을철 시기의 연구 결과는 다른 구간에 비하여 중·하류 구간에서 전 시기에 영향을 미치는 수질 항목과 매우 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 중·하류 구간은 유량이 증가하고 유속이 감소하며 상류로부터의 오염물질이 누적되는 구간으로, 이런 결과로부터 여름/가을철 수질관리가 전 시기 동안 지배적일 수 있으며 따라서 관리의 필요성이 매우 큰 구간임을 시사했다.

4. 결론

본 연구에서는 안동1 지점부터 구포 지점까지 낙동강 본류를 대상으로 시·공간적 수질 특성 분석과 주요 수질 인자들을 도출하였다. 낙동강은 수질 특성에 따라 공간적으로 상류(~상주1), 중·상류(~달성), 중·하류(~구포) 구간으로 분류되었으며, 시간적으로 여름/가을철(7~10월)과 그 외 시기(11~6월)로 분류되었다. 전체적인 낙동강의 수질은 영양염류(N, P)와 유기물질(BOD, COD), 대장균군(TC, FC) 항목에 의해 결정되었으며, 중·하류 구간과 유사한 경향성을 보이며 중·하류 구간의 수질 관리에 대한 중요성을 드러냈다. 비점 수질 항목인 SS와 TP는 경향 분석 결과 감소 경향을 나타내긴 했지만 여름/가을철 시기에는 전 구간에 걸쳐 비점 오염물질들의 영향을 주목해야 하며, 특히, 오염물의 저장소가 되는 중·하류 구간에서의 여름/가을철 비점오염원 관리의 필요성을 시사했다. 또한, 여름/가을철 외 시기와는 달리 대장균군에 의한 영향도 중요하게 고려해야 함을 알 수 있었다. 반면, 여름/가을철 외 시기에는 전 구간에 걸쳐 질소 계열과 유기성 오염물질의 영향이 중요한 인자로 작용함을 알 수 있었으며, 특히, 전 시기의 제 1 요인의 결과와 동일한 결과를 나타낸 중·상류 구간에서의 점오염원 관리의 중요성을 알 수 있었다. 시간별 경향성 또한 질소 계열의 경우 서로 일정한 경향성을 나타내진 않았지만, 유기물질(COD, TOC)은 시간별 증가 경향을 나타내면서 점오염원의 제어에 대한 필요성을 드러냈다.

본 연구 결과는 낙동강수계에서 시기별, 구간별로 관리해야 하는 우선적인 수질 항목에 대한 정보를 제공했다. 기상변화, 보의 영향 등 하천 환경의 변화는 우선 관리해야 하는 수질 항목을 변화시킬 수 있으며, 수심이 깊어지고 유속이 느려지며 오염물질이 누적되는 하류 구간으로 갈수록 이러한 하천 환경의 변화에 의해 수계는 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 장기간의 누적된 데이터를 이용하여 수계에 지배적인 영향을 미치는 수질 인자들을 지속적으로 추적하는 것이 필요하며, 이는 변화하는 하천 환경에 대해 수계를 제대로 관리할 수 있는 토대를 제공할 것이다. 또한 이러한 연구를 통해 낙동강 유역에서 본류로 배출되는 관리대상에 대한 정보를 파악할 수 있으며, 오염총량관리제 등 수질관리 정책을 위한 의사결정 토대를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 낙동강수계 단위유역 모니터링사업의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-05-01-006).

REFERENCES

- Arai, T., Ikejima, N., 1980, A Survey of Plesiomonas shigelloides from aquatic environments, domestic animals, pets and humans, *J. Hyg.*, 84(2), 203-211.
- Araujo, R. M., Arribas, R., Lucena, F., Pares, R., 1989, Relation between Aeromonas and fecal coliforms in fresh waters, *J. Appl. Bacteriol.*, 67(2), 213-217.
- Back, S., 2014, Distribution characteristics of chemical oxygen demand and Escherichia coli based on pollutant sources at Gwangyang Bay of South Sea in Korea, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society (JKAIS)*, 15(5), 3279-3285.
- Beck, Y. S., Sohn, J. S., 2006, Studies on the effect of water quality parameters on total coliform concentration in sewage effluents, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 22(1), 166-171.
- Canosa, A., Pinilla, G., 1999, Bacteriological eutrophication indicators in four Colombian water bodies (South America), *Lakes Reserv. Res. Manag.*, 4, 23-27.
- Cho, H. K., 2011, A Study on the related characteristics of discharge-water quality in Nakdong river, *Journal of Environmental Science International (JESI)*, 20(3), 373-384.
- Gwak, B. R., Kim, I. K., 2015, The evaluation of water quality using a multivariate analysis in Changnyeong-Haman weir section, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater (JKSWW)*, 29(6), 625-632.
- Gwak, B. R., Kim, I. K., 2016, Characterization of water quality in Changnyeong-Haman weir section using statistical analyses, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers (KSEE)*, 38(2), 71-78.
- Hiraishi, A., Saheki, K., Horie, S., 1984, Relationships of total coliform, fecal coliform, and organic pollution levels in Tamagawa River, *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 50(6), 991-997.
- Jeon, Y. I., 2012, The assessment of the quality of Nakdong River and the analysis of correlation according to the items of water quality, Yeungnam

- University, Korea.
- Jung, K. W., Yoon, C. G., Jang, J. H., Jeon, J. H., 2006, Water quality and correlation analysis between water quality parameters in the Hwaong watershed, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 48(1), 91-102.
- Jung, K. Y., Ahn, J. M., Kim, K. S., Lee, I. J., Yang, D. S., 2016, Evaluation of water quality characteristics and water quality improvement grade classification of Geumho River tributaries, *Journal of Environmental Science International (JESI)*, 25(6), 767-787.
- Jung, S. Y., Kim, I. K., 2017, Analysis of water quality factor and correlation between water quality and Chl-a in middle and downstream weir section of Nakdong River, *Journal of Korean Society Environmental Engineers (KSEE)*, 39(2), 89-96.
- Kim, G. H., Jung, K. Y., Yoon, J. S., Cheon, S. U., 2013, Temporal and spatial analysis of water quality data observed in lower watershed of Nam river dam, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 13(6), 429-437.
- Kim, G. H., Jung, K. Y., Lee, I. J., Lee, K. L., Cheon, S. U., Im, T. H., Yoon, J. S., 2014, A Study on instream flow for water quality improvement in lower watershed of Nam River dam, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 30(1), 44-59.
- Kim, H. C., Lee, S. B., Jung, K. W., Han, J. Y., 2004, Analysis of correlation among the pollutant concentrations in stream to the estuary reservoir, *Journal of the Korea Society of Water and Wastewater (JKSWW)*, 62-71.
- Kim, J. G., Lee, J. Y., 2001, Application of QUAL2E model for water quality management in the Keum River(I) - Estimation of model input parameter and autochthonous BOD-, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 10(2), 119-127.
- Kim, K. A., Kim, Y. J., Song, M. J., Ji, K. W., Yu, P. J., Kim, C. W., 2007, Evaluation of water quality characteristics in the Nakdong River using multivariate analysis, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 23, 814-821.
- Kim, K. M., Lee, I. R., Kim, J. T., 2008, Factor analysis of the trend of stream quality in Nakdong River, *Journal of the Korean Data and Information Science Society (JKDIS)*, 19(4), 1201-1210.
- Kim, M. S., Chung, Y. R., Suh, E. H., Song, W. S., 2002, Eutrophication of Nakdong River and statistical analysis of environmental factors, *Algae*, 17(2), 105-115.
- Kim, O. S., 2005, A Study on the application of total maximum daily loads management in lower watershed of Nam River, Doctoral thesis, Gyeongsang National University, 90-158.
- Kim, S. M., Kim, S. M., Park, T. Y., 2010, Spatial analysis of BOD data in Namgang-Dam watershed for TMDLs, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 52(3), 81-88.
- Lee, N. D., Kim, J. G., 2007, The evaluation of water quality in coastal sea of Kunsan using statistic analysis, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 16(3), 369-376.
- Lee, S. H., 2015, A Study on mass balance analysis and water quality management of weir segments, Nakdong River Watershed Management Committee, 36-37.
- Min, Y. H., Hyun, D. Y., Eum, C. H., Chung, N. H., Kang, S. W., Lee, S. H., 2011, A Study on relationship of concentration of phosphorus, turbidity and pH with temperature in water and soil, *Journal of Analytical Science and Technology (JAST)*, 24(5), 378-386.
- NRERC, 2009, '08 management report of target water quality monitoring system in Nakdong River basin, Nakdong River Environment Research Center, 142-163.
- Park, J. H., Moon, M. J., Lee, H. J., Kim, K. S., 2014, A Study on characteristics of water quality using multivariate analysis in Sumjin River basin. *J. Korean Soc. Water Environ.*, 30(2), 119-127.
- Park, T. Y., Kim, S. J., Kim, S. M., Kim, S. M., 2010, Temporal and spatial analysis of water quality data observed from major water quality stations in Nakdonggang watershed, *J. Agric. Life Sci.*, 44(5), 117-127.
- Ramteke, P. W., Bhattacharjee, J. W., Pathak, S. P., Kaira, N., 1992, Evaluation of coliforms as indicators of water quality in India. *J. Appl. Bacteriol.*, 72, 352-356.
- Seo, Y. J., Kwak, S. H., Lee, K. S., Lyu, S. W., 2016, Multi-variate analysis for water quality characteristics at lower reach of Geumho River confluence in Nakdong River, 2016 Korean Society of Civil Engineers Annual Meeting, Jeju, 304-305.
- Yu, J. J., Shin, S. H., Yoon, Y. S., Kang, D. K., 2012, Water quality prediction and forecast of pollution source in Namgang mid-watershed each reduction

scenario, Korean Society of Environmental Impact Assessment, 21(4), 543-552.

-
- 서미진, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구사
mjseo1020@korea.kr
 - 조창대, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 전문위원
ship44@korea.kr

-
- 임태효, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구관
imtoehyo@korea.kr
 - 김상훈, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구관
haemy@korea.kr
 - 윤현정, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 전문위원
uddi@korea.kr
 - 김용석, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 소장
nierkys@korea.kr
 - 김경훈, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 전문위원
dahong@korea.kr