

다변량 통계분석을 이용한 북한강의 수질 및 식물플랑크톤 군집 특성 평가

김현년^a · 윤석제^b · 변명섭^c · 유순주^d · 임종권^{e,*}

국립환경과학원 한강물환경연구소

Evaluation of Water Quality and Phytoplankton Community Using a Multivariate Analysis in Bukhan River

Hun Nyun Kim^a · Seok Jea Youn^b · Myeong Seop Byeon^c · Soon Ju Yu^d · Jong Kwon Im^{e,*}

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 24 October 2018, Revised 2 December 2018, Accepted 7 December 2018)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the water quality and phytoplankton community in Bukhan River which account for 44.4 % of the total inflow into Lake Paldang, using multivariate statistical techniques (i.e., correlation analysis, principal component analysis (PCA)/factor analysis (FA)). Water samples were collected from March to November 2015 and the following parameters measured; water temperature, pH, DO, EC, SS, BOD, Chl-*a*, COD, TN, NO₃-N, NH₃-N, TP, DTP, PO₄-P, and phytoplankton community. The water quality of the main stream and the tributaries were not significantly different apart from the relatively high concentration of BOD, COD and nutrients recorded in MH. The highest cell density of *Stephanodiscus hantzschii* and *Merismopedia glauca* dominated phytoplankton was observed in PD. Based on the correlation analysis, total phytoplankton and cyanophyceae were highly correlated with BOD, COD and nutrients. PCA/FA resulted in four main factors accounting for 82.240 % of the total variance in the water quality dataset. The group of component 1 (TN, DTN, DO, NO₃-N, water temperature) and component 2 (PO₄-P, T-P, DTP, SS) were classified as nutrient element factor whereas component 3 (Chl-*a*, COD, BOD, NH₃-N, pH) was related to organic substances. Hence, the identification of the main potential environmental pollution factors in Bukhan River will help policy makers make better and more informed decisions on how to improve the water quality.

Key words : Bukhan River, Multivariate analysis, Phytoplankton community, Water quality

^a 전문위원(Researcher), wufniks@koera.kr, http://orcid.org/0000-0002-3339-4486

^b 전문위원(Researcher), cooker@korea.kr, http://orcid.org/0000-0003-1045-4754

^c 연구관(Researcher), zacco@korea.kr, http://orcid.org/0000-0003-0997-2415

^d 소장(Director), ysu4205@naver.com, http://orcid.org/0000-0002-1860-131X

^{e,*} Corresponding author, 연구사(Researcher), limjkk80@korea.kr, http://orcid.org/0000-0003-3994-5127

1. Introduction

팔당호는 1973년에 식수원 및 발전, 치수 등을 위해 조성된 다목적 인공호로 비교적 수심이 얇고, 체류시간이 짧은 하천형 호수의 특징을 가지고 있다. 또한 남·북한강 및 경안천이 합류하는 지점에 위치하여 복잡한 혼합 양상과 시공간적 수질 및 수리변화가 동시에 일어나는 특징을 지닌다(NIER, 2016).

팔당호로 유입되는 남한강, 북한강 및 경안천의 유량은 54:44:2의 비율을 보이고 있으며, 각 유역으로부터 지속적으로 유입되는 영양물질로 인해 담수 후 약 10년이 지난 시점부터 부영양화가 지속되고 녹조현상 등 수질문제가 나타나고 있다(Kim et al., 1988). 팔당호는 국내 최대 상수원이며 특히, 수도권의 주요한 상수원이기 때문에 이러한 수질 문제가 나타나났을 시에는 사회적 영향과 이를 처리하기 위한 경제적 영향이 크다. 이에 따라 팔당호를 대상으로 수질오염 저감 대책이 지속적으로 이루어지고 있다.

팔당호로 유입되는 유역 중 북한강은 상류에 5개의 댐이 위치하고 있어 유속 및 유량의 영향을 크게 받으며, 강을 따라 도시 및 산업시설, 각종 레저 시설이 산재해 있어 이로 인한 영양물질 부하를 크게 받는다. 특히, 팔당호와 만나는 하류부에서는 체류시간의 증가와 동시에 영양물질이 축적되어 여름철 녹조현상이 지속되고 있다(Byun et al., 2015).

북한강 하류는 청평댐의 방류량에 직접적인 영향을 받으며 상류에서부터 조종천, 구운천, 벽계천, 묵현천 등 여러 하천이 유입되고 있다. 소하천은 상류의 점오염원 및 비점오염원의 유입통로가 되고, 하류에는 유역에서 발생하는 하·폐수를 처리하는 환경기초시설이 위치해 있어 하수처리수가 방류될 시 일시적으로 부하량이 증가될 수 있다(ME, 2015).

이와 같이 북한강 하류의 수질은 상류댐의 방류량으로 인한 수량 변화와 이에 따른 체류시간 변화 및 수체의 혼합, 소유역으로부터 유입되는 영양물질의 영향, 내부 생성 유기물 부하 등 다양한 요인에 의해 변화하며, 각 시기 및 지점에서 수질오염에 영향을 미치는 인자는 서로 다르다. 또한 영양물질의 증가는 식물플랑크톤 발생에 영향을 주는 주요 요인이지만, 수질인자 뿐 아니라 기상, 수리 등의 요인이 더해지기 때문에 1차원적인 요인으로는 식물플랑크톤의 증감을 설명하기는 부족하다.

다변량 통계분석은 다양한 변수를 동시에 분석할 수 있는 모든 통계적인 기법을 말하며, 이를 통해 대상지역에 영향을 미치는 주성분을 도출하고 여러 수질인자 및 요인에 대한 정보를 요약하여 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다변량 통계분석을 통한 수질의 연구는 금강(Kim et al., 2007), 섬진강(Park et al., 2014) 낙동강의 연구(Gwak and Kim, 2015; Gwak and Kim, 2016; Lee and Kim, 2017) 등에 다양하게 활용되고 있다. 또한, 한강수계 14개 지점의 수질 평가(Kim and Lee, 2011), 오염물질 배출특성 분석(Choi et al., 2015) 등의 연구에 활용 되고 있다. 본

연구에서는 팔당호로 유입되는 북한강에서 다변량 통계분석을 사용해 수질과 식물플랑크톤 발생에 영향을 미치는 요인을 분석하고 제시하고자 하였으며, 향후 본 결과를 활용한 팔당호 북한강 구간의 수질관리정책 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 조사지점 및 시기

북한강의 수질과 식물플랑크톤 군집의 특성을 평가하기 위해 북한강에 위치한 청평(CP), 삼봉(SB)과 북한강이 합류하는 팔당댐2(PD)를 대상으로 하였다. 또한 북한강으로 합류하는 유입천의 수질을 평가하기 위해 수질측정망지점을 기준으로 조종천3(JJ), 묵현천(MH), 벽계천(BG), 구운천(GW)을 선정하였다. 수질 자료는 결빙기를 제외하고 2015년 3월~2015년 11월까지의 자료를 사용하였으며, 식물플랑크톤 군집은 2015년 1월부터 2015년 11월까지 분류 구간에 대해 조사하였다.

2.2 수질 및 식물플랑크톤 분석

수온, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC), 부유물질(SS), Chl-*a*, 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 총질소(TN), 용존총질소(DTN), 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성 질소(NO₃-N), 총인(TP), 용존총인(DTP), 인산염인(PO₄-P)은 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)의 자료를 이용하였다.

식물플랑크톤의 채집은 PD, SB, CP 지점을 대상으로 하였으며, 채수한 시료는 냉장하여 실험실로 운반한 후 일정량을 취해 Lugol's solution을 최종농도 1%가 되도록 첨가하여 고정하였다. 고정된 시료는 1 mL를 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣고 15분간 정치시켜 침전시키고 광학현미경에서 200~1,000 배율 하에서 10칸 이상 반복 계수하여 mL당 식물플랑크톤 세포수를 계산하였다. 각 지점에서 출현한 식물플랑크톤 분류군의 동정 및 분류는 Chung (1993), Hirose et al. (1977), John et al. (2002), Patrick and Reimer (1966, 1975), Prescott (1962), Prescott et al. (1981, 1982)을 참조하였다.

2.3 통계분석

통계분석은 SPSS(ver. 20.0) 프로그램을 이용 하였으며, 상관분석은 변수간의 관련성을 분석하기 위해 Pearson's correlation analysis를 사용하였다. 주성분 분석은 다변량 분석의 여러 기법 중에서 기본이 되는 분석법으로 여러 종류의 변수들의 정보를 요약하여 표현하며, 상호관련이 있는 요인들 간의 변화양상으로부터 고유의 패턴을 도출하여 축소된 차원의 자료를 통해 다변량 자료의 경향을 분석할 수 있다(Park and Rhee, 2012). 요인분석은 변수들 간의 상관성을 간결하게 표현하며, 상관성이 높은 변수들 간의 공통성을 중심으로 통합해주는 분석 방법이며(Park et al., 2014), 이를 통해 추출된 고유치(Eigen Value)는 요인과 변수와의

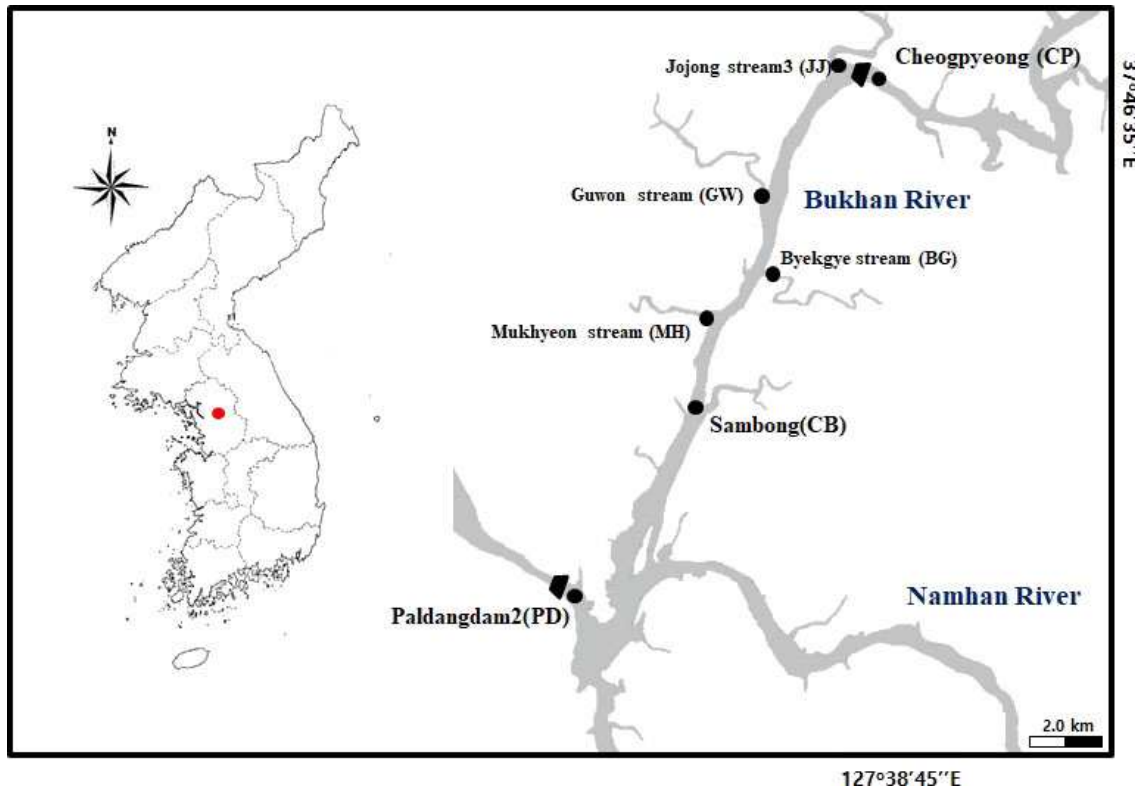


Fig. 1. Study area with sampling location

상관계수에 따른 요인 구조 명확화를 위해 직교회전방식 (Varimax)을 적용하였다. 다변량 분석방법은 주성분 분석 및 요인분석을 사용하여 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1 북한강 및 유입지천의 수질특성

2015년 3월~2015년 11월까지 북한강 하류 및 유입지천의 수질특성을 Fig. 2에 나타내었다. 수온은 2.4~30.1 °C의 범위로, 중앙값은 JJ 지점에서 21.5 °C로 가장 높았다. 수온은 대부분의 지점에서 큰 차이를 보이지 않았으나, MH 지점에서 10.2 °C~27.2 °C의 범위로 사분위수범위(IQR)가 작게 나타났다. 이는 목현천 하류에 위치한 화도푸른물센터 방류수의 영향으로 수온의 편차가 크지 않은 것으로 판단된다(Hwang et al., 2016; Kim et al., 2005). pH와 DO의 범위는 각각 pH 6.9~9.1, 6.2~17.2 mg/L로 지점별 유사하였다. EC는 평균 208 μS/cm (68~503 μS/cm)로 나타났으며, MH 지점을 제외하면 68~267 μS/cm의 범위를 보였으나, MH 지점에서는 289~531 μS/cm의 범위를 보여 다른 지점과 비교했을 때 높은 값을 나타냈다. Cho et al. (2017)에 의하면 처리장으로 유입되는 하수는 순수하수가 아닌 음식물처리수 및 공단폐수가 혼합되어 있을 경우 전기전도도가 높다고 보고하였으며, Kaviraj and Satyawati (2003)는 하수슬러지 분해시 PO_4^{3-} , NH_4^+ , K^+ 염이 방출되면서 전기전도도가 높아진다고 보고하였다. 또한 경안천과 팔당호의 연구(Shin et al., 2001)에서 하수처리장 방류수의 EC는 평균

952 μS/cm로 높은 값을 보여, MH 지점과 유사한 결과를 나타냈다. SS는 0.3~67.0 mg/L의 범위였고, MH 지점에서 비교적 높은 평균값(10.4 mg/L)을 보였다. Chl-a의 평균은 6.3 mg/m³(0.1~55.8 mg/m³)로 유입지천보다 북한강 본류 지점에서 중앙값이 크고 사분위수범위가 넓었으며, 특히 PD에서 중앙값이 가장 크게 나타났다. 유입지천 중에서는 GW 지점이 Chl-a가 가장 높았다.

BOD와 COD의 평균은 각각 1.1 mg/L (0.3~7.8 mg/L), 3.6 mg/L (1.3~8.3 mg/L)으로 두 항목 모두 MH 지점에서 높은 경향을 보였는데 이는 Shin et al. (2000)의 연구결과와 같이 목현천 수질이 잠재적 유기오염도가 큰 것으로 판단되며, 다른 지점과 비교하여 상대적으로 BOD보다 COD의 편차가 큰 이유는 목현천 상류에 위치한 주거 밀집지역과 산업단지의 영향을 받아 미생물분해가 어려운 고분자 유기물의 함량이 높은 것으로 추정된다(Hwang and Park, 2018; Imai et al., 2002).

T-N, DTN, NO₃-N, NH₃-N의 범위는 각각 0.441~15.005 mg/L, 0.417~14.675 mg/L, 0.170~6.013 mg/L, 0.001~10.477 mg/L로 나타났다. 질소농도도 다른 항목과 같이 MH 지점에서 매우 높은 경향을 보였는데, 전체 지점의 평균이 각각 2.723 mg/L, 2.630 mg/L, 1.885 mg/L, 0.297 mg/L인데 반해, MH 지점의 평균은 7.503 mg/L, 7.220 mg/L, 4.410 mg/L, 1.718 mg/L로 큰 차이를 보였다. T-P, DTP, PO₄-P의 범위는 각각 0.006~0.450 mg/L, 0.003~0.250 mg/L, 0.000~0.234 mg/L로 인 농도의 경우도 각각의 항목에서 MH 지점이 상대적으로 높게 나타났다.

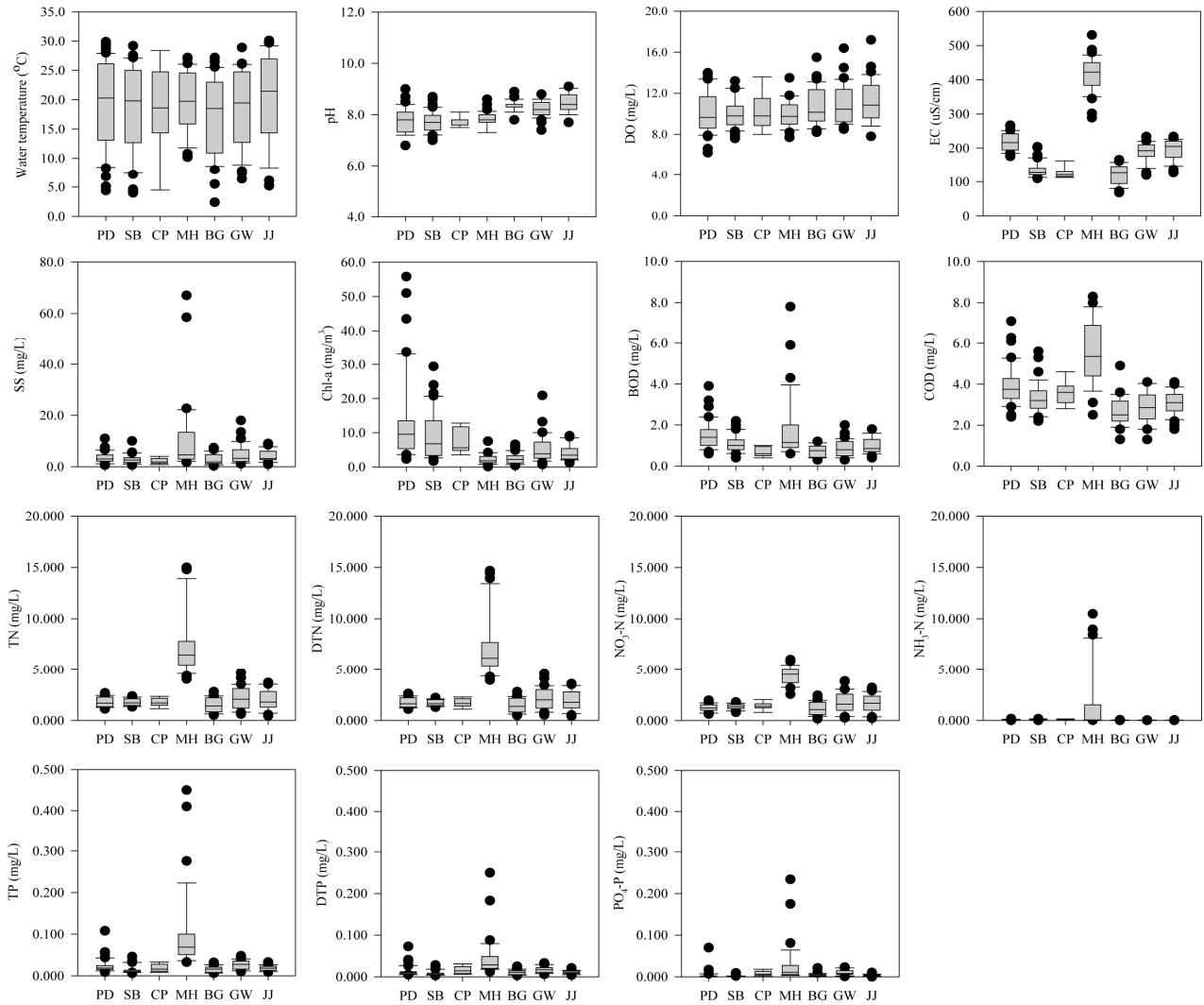


Fig. 2. Water quality parameters at different locations from Mar. to Nov. 2015.

질소와 인 관련 수질항목들의 각 지점에 대한 월별 변화에서 상대적으로 MH 지점에서 높은 경향이 나타났다(Fig. 3). MH 지점은 목현천 상류에 주거 밀집지역과 산업단지가 위치하여 영양물질 부하가 크며, 하류에는 화도푸른물센터가 위치하여 방류수의 수질에 직접적인 영향을 받는다. 일반적으로 방류수에 존재하는 질소와 인은 미생물을 통한 생물학적 처리를 이용하는데, 생물반응조 내 미생물의 활성은 특히 온도에 영향을 많이 받으며, 겨울철에는 생물학적 처리의 효율이 감소한다고 보고되고 있다(Kim, 2010). MH 지점의 영양물질 농도는 저수온기 뿐만 아니라 전 계절 항상 높은 것으로 나타나, 하수처리장 방류수의 영향을 직접적으로 받는 것으로 생각된다.

3.2 식물플랑크톤 세포수 및 우점조류 변화

각 지점의 식물플랑크톤 세포수 및 분류군별 우점도를 Fig. 4에 나타내었다. PD의 식물플랑크톤 세포수는 평균 6,397 cells/mL (939 ~ 34,035 cells/mL)로 가장 많았고, SB는 평균 3,759 cells/mL(1,050 ~ 11,217 cells/mL)였으며, CP는 2,788 cells/mL (650 ~ 5,360 cells/mL)로 가장 적은 세포수를

나타냈다. 각 지점에서는 수온이 높아지는 6월부터 유해남조류가 출현하였으며, PD 지점에서는 8월에 최대 27,860 cells/mL의 세포수를 기록하였고, SB 지점은 최대 4,221 cells/mL, CP 지점의 유해남조류는 최대 411 cells/mL로 나타났다.

세 지점 중 상류에 위치한 CP 지점은 식물플랑크톤 세포수가 적었으며, 여러 유입천을 지나 SB 지점에 이르러 세포수가 증가하였다. 일반적으로 팔당호로 유입되는 유량은 남한강이 52.7 % 북한강이 44.4 %로 알려져 있으며(Kong, 1996), PD 지점에서는 북한강에서 유입되는 식물플랑크톤 뿐만 아니라 영양염 부하가 높은 경안천의 유입(Shin et al., 2000; Shin et al., 2001; Yi and Park, 2004)과 남한강에서 유입되는 *Stephanodiscus hantzschii* 및 *Merismopedia glauca* 등과 같은 세포크기가 작고 증식이 빠른 식물플랑크톤의 영향, 체류시간 증가(Kim et al., 2014; Song et al., 2015)로 인한 여름철 유해남조류의 증가 등의 영향으로 식물플랑크톤 세포수가 크게 증가한 것으로 판단된다.

PD의 우점종 천이는 3월 ~ 4월에 크기가 작고 증식이 빠른 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii*가 성장하면서 규조

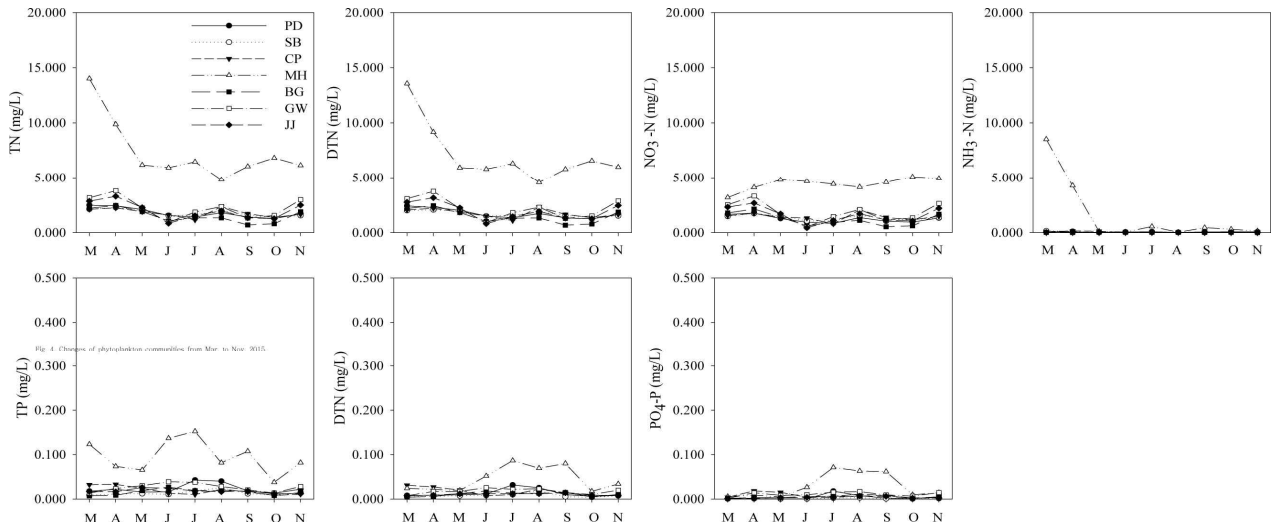


Fig. 3. Monthly variations of nitrogen and phosphorus from Mar. to Nov. 2015.

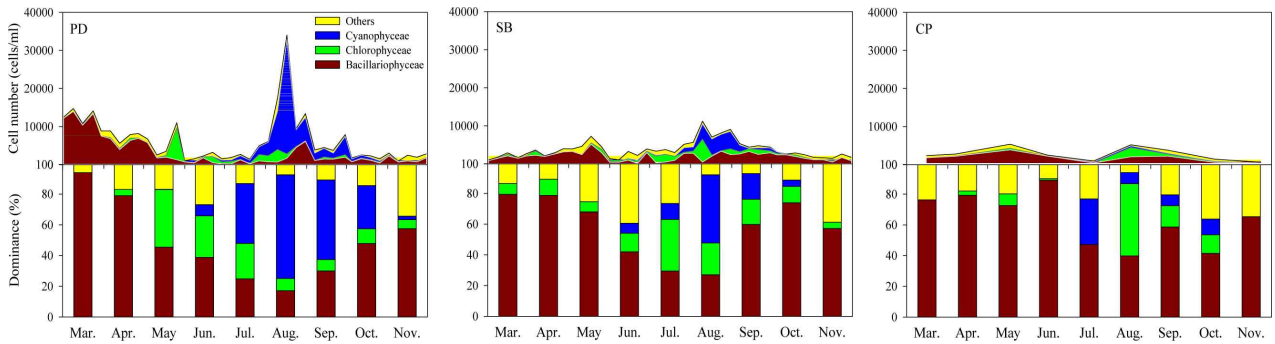


Fig. 4. Changes of phytoplankton communities from Mar. to Nov. 2015.

류의 우점도가 각각 94.2%와 79.0%로 높았고, 5월~6월에 녹조류의 점유율이 서서히 증가하다가 고수온기인 7월~9월에 남조류가 증가하면서 최대 67.4%의 점유율을 보였다. 이후 수온의 감소에 따라 규조류와 기타조류가 우점하는 전형적인 온대기후의 천이 과정이 나타났다(Hutchinson, 1967). SB도 수온이 증가하는 시기(늦봄)에 녹조류의 증가와 고수온기(여름~초가을)에 남조류가 증가하는 유사한 천이과정을 보였다. 하지만, 저수온기(겨울~봄철)에 규조류의 점유율은 높았으나, 식물플랑크톤 총세포수는 적어 PD 지점과는 다른 양상을 보였다. PD와 달리 SB는 비교적 세포 크기가 큰 *Synedra*속 및 *Asterionella*속, 그리고 *Fragilaria*속이 우점 하였다(NIER, 2016). CP 지점은 강우 후 세포수가 낮은 가운데 남조류의 점유율이 증가하는 경향을 보였고 8월에 *Mougeotia*속의 증가로 녹조류가 일시적으로 우점 하였으나 전체적으로 낮은 세포수를 보였다(Table 1).

3.3 수질항목별 상관분석 결과

수질인자간의 상관분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 수온과 DO의 상관관계수는 -0.645로 온도가 상승할수록 DO가 낮아지는 일반적인 경향을 나타냈으며, 질소 화합물인 TN, DTN, NO₃-N, NH₃-N과 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 앞서 언급하였듯이 전 지점 저수온기에 상대적으로

높은 질소 농도 및 하수처리장 방류수의 영향을 받은 MH 지점에서 높게 나타났기 때문인 것으로 판단된다(Kim, 2010). SS는 BOD, COD, 그리고 인 화합물(TP, DTP, PO₄-P)과 높은 상관관계를 보였으며, 강우 시 상류 및 각 유역의 유입에 의한 것으로 보인다. Chl-*a*는 NH₃-N와 상관관계수 -0.339로 음의 상관관계를 나타냈다. Kappers (1980)에 따르면 NH₃-N은 식물플랑크톤의 성장 시 쉽게 이용할 수 있는 질소의 형태로 알려져 있으며, 식물플랑크톤 증가로 인해 음의 상관관계가 보인 것으로 판단된다.

3.4 수질과 식물플랑크톤의 상관성 분석

조류와 각각의 수질인자와의 상관관계를 Table 3에 나타내었다. 수온은 총세포수와 유의한 상관성을 보이지 않았으나, 각 분류군별로 규조류(-0.406)와 음의 상관관계를 나타냈으며 녹조류(0.324), 남조류(0.364)와는 양의 상관관계를 보여 Yu et al. (2014)의 연구와 유사한 경향을 보였다. SS는 계수 값이 0.541로 총세포수와 양의 상관성을 나타냈으며, 녹조류보다는 규조류(0.293)와 남조류(0.448), 기타조류(0.349)와 상관성이 있는 것으로 나타났다. Chl-*a*와 총세포수는 0.679로 높은 관련성을 보였으며, 남조류(0.742)와 높은 상관관계를 보여 남조류 우점과 Chl-*a*의 관련을 설명한 대청호(Shin et al., 1999), Chl-*a*와 총세포수 및 유해남조류

Table 1. Changes of dominant species from Mar. to Nov. 2015

| Month | PD | | SB | | CP | |
|-------|---|------|---|------|---|------|
| | Dominant species | (%) | Dominant species | (%) | Dominant species | (%) |
| 3 | <i>Stephanodiscus hantzschii</i> | (88) | <i>Asterionella formosa</i> | (19) | <i>Asterionella formosa</i> | (28) |
| 4 | <i>Stephanodiscus hantzschii</i> | (50) | <i>Synedra acus</i> | (48) | <i>Synedra acus</i> | (59) |
| 5 | <i>Chlamydomonas</i> sp. | (35) | <i>Fragilaria crotonensis</i> | (17) | <i>Synedra delicatissima</i> | (20) |
| 6 | <i>Fragilaria crotonensis</i> | (24) | <i>Aulacoseira granulata</i> | (31) | <i>Fragilaria crotonensis</i> | (57) |
| 7 | <i>Merismopedia glauca</i> | (19) | <i>Rhodomonas</i> sp. | (24) | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (27) |
| 8 | <i>Microcystis aeruginosa</i> | (33) | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (16) | <i>Mougeotia</i> sp. | (41) |
| 9 | <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> | (27) | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (20) | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (20) |
| 10 | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (29) | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (50) | <i>Rhodomonas</i> sp. | (33) |
| 11 | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (31) | <i>Rhodomonas</i> sp. | (31) | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | (42) |

Table 2. Pearson correlation among the water quality parameters

| | Temp | pH | DO | BOD | COD | SS | EC | TN | DTN | NO ₃ -N | NH ₃ -N | TP | DTP | PO ₄ -P | Chl- <i>a</i> |
|--------------------|------|-------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|--------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|---------------|
| Temp | 1 | 0.117 | -0.645** | 0.277** | 0.601** | 0.226* | 0.169 | -0.484** | -0.481** | -0.471** | -0.581** | 0.230* | 0.322** | 0.161 | 0.382** |
| pH | | 1 | 0.402** | 0.465** | 0.377** | 0.057 | 0.282** | 0.243* | 0.240* | 0.242* | -0.311** | 0.039 | 0.066 | -0.137 | 0.415** |
| DO | | | 1 | 0.316** | -0.080 | -0.077 | -0.041 | 0.740** | 0.745** | 0.631** | 0.290** | -0.059 | -0.082 | -0.183 | 0.057 |
| BOD | | | | 1 | 0.699** | 0.511** | 0.351** | 0.396** | 0.399** | 0.252* | -0.183 | 0.448** | 0.348** | 0.104 | 0.686** |
| COD | | | | | 1 | 0.650** | 0.214* | 0.007 | -0.009 | 0.017 | -0.295** | 0.481** | 0.476** | 0.254* | 0.781** |
| SS | | | | | | 1 | 0.033 | 0.215* | 0.191 | 0.236* | -0.086 | 0.651** | 0.486** | 0.482** | 0.593** |
| EC | | | | | | | 1 | -0.015 | -0.010 | -0.245* | -0.077 | 0.190 | 0.120 | -0.030 | 0.092 |
| TN | | | | | | | | 1 | 0.983** | 0.859** | 0.329** | 0.257* | 0.176 | 0.140 | 0.015 |
| DTN | | | | | | | | | 1 | 0.852** | 0.297** | 0.253* | 0.182 | 0.146 | 0.005 |
| NO ₃ -N | | | | | | | | | | 1 | 0.169 | 0.154 | 0.084 | 0.094 | 0.116 |
| NH ₃ -N | | | | | | | | | | | 1 | 0.135 | 0.120 | 0.291** | -0.339** |
| TP | | | | | | | | | | | | 1 | 0.925** | 0.825** | 0.349** |
| DTP | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.835** | 0.279** |
| PO ₄ -P | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.075 |
| Chl- <i>a</i> | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$

의 관계를 설명한 수원 일월저수지의 연구(Kim et al., 2013)와 유사한 결과를 나타내었다. BOD와 COD는 상관계수가 각각 0.759, 0.638로 총세포수와 강한 양의 상관관계를 나타냈으며, 분류군별로도 남조류 및 기타조류와 관련이 높아 서로 유사한 패턴을 보였다. 질소는 TN, DTN이 총세포수와 약한 양의 상관성을 보였으며, 다른 분류군 보다 규조류와 상관성(TN: 0.569, DTN: 0.571)이 높았다. NO₃-N은 계수 값이 0.449로 규조류와 양의 상관성을 보였으며, NH₃-N은 녹조류 및 남조류와 관련이 있었다. 인 항목 중

TP, DTP가 전체세포수와 약한 양의 상관관계를 보여 질소와 유사한 결과를 보였으나, 질소와는 달리 규조류 보다는 남조류와 상관성이 있는 것으로 나타났다.

3.5 주성분 분석 및 요인분석

북한강에서의 수질항목을 대상으로 주성분분석 및 요인분석을 실시하였다. 주성분을 결정하기 위해서 15개의 요인 중 고유치의 값이 1 이상인 요인만을 추출하는 방식을 사용하였으며(Kim et al., 2007), 전체 수질에 대한 주성분

분석 결과 4개의 주성분이 추출되었다(Table 4). 제 1요인의 고유치는 4.733으로 31.566%를 기여하고, 제 2요인의 고유치는 4.031로 26.875%를 기여하였다. 나머지 제 3요인과 제 4요인은 고유치가 각각 2.410 (16.064%), 1.162 (7.745%)를 나타냈다. 제 1요인~제 4요인은 전체 분산의 82.240%를 설명하며, 우리나라 주요 수계의 주성분분석 결과를 비교해 보면, 낙동강의 연구(Gwak and Kim, 2015)는 81.071%로 유사하였고, 섬진강의 연구(Park et al., 2014)는

68.990%로 북한강 보다 주성분이 차지하는 비중이 낮게 나타났다.

요인분석 결과는 변량과의 상관계수에 따른 요인 구조를 명확하게 나타내주는 Varimax 방식을 적용하였다(Table 5). 제 1요인은 T-N, DTN, DO, NO₃-N, 수온이었고, 제 2요인은 PO₄-P, T-P, DTP, SS였다. 제 3요인은 Chl-*a*, COD, BOD, NH₃-N, pH로 나타났으며, 제 4요인은 EC였다. 요인분석 결과 제 1요인에서는 질소항목이 대부분을 차지하였고, 이는 대상지점에서의 질소 부하량이 높은 것으로 사료되며, 제 2요인은 인과 부유물질 항목으로 낙동강의 연구(Gwak

Table 3. Pearson correlation coefficients between phytoplankton taxa and water quality

| | Total phytoplankton | Bacillario phyceae | Chloro phyceae | Cyano phyceae | Others |
|--------------------|---------------------|--------------------|----------------|---------------|---------|
| WT | 0.130 | -0.406** | 0.324** | 0.364** | 0.274** |
| pH | 0.411** | 0.188 | 0.079 | 0.341** | 0.357** |
| DO | 0.354** | 0.561** | -0.111 | 0.061 | 0.104 |
| EC | 0.212* | 0.149 | 0.097 | 0.101 | 0.097 |
| SS | 0.541** | 0.293** | 0.092 | 0.448** | 0.349** |
| Chl- <i>a</i> | 0.679** | 0.100 | 0.153 | 0.742** | 0.617** |
| BOD | 0.759** | 0.320** | 0.242* | 0.621** | 0.504** |
| COD | 0.638** | 0.109 | 0.181 | 0.687** | 0.584** |
| T-N | 0.316** | 0.569** | 0.037 | -0.059 | -0.107 |
| DTN | 0.318** | 0.571** | 0.055 | -0.070 | -0.124 |
| NO ₃ -N | 0.267* | 0.449** | -0.009 | -0.013 | -0.052 |
| NH ₃ -N | -0.163 | 0.145 | -0.214* | -0.211* | -0.186 |
| T-P | 0.341** | -0.016 | 0.233* | 0.363** | 0.205 |
| DTP | 0.272** | -0.131 | 0.310** | 0.342** | 0.175 |
| PO ₄ -P | 0.060 | -0.113 | 0.200 | 0.100 | -0.030 |

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$

Table 5. Rotated component matrix by factor analysis

| Variable | Component | | | |
|--------------------|-----------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| T-N | 0.943 | 0.181 | 0.023 | 0.035 |
| DTN | 0.939 | 0.175 | 0.020 | 0.045 |
| DO | 0.883 | -0.187 | 0.014 | 0.144 |
| NO ₃ -N | 0.878 | 0.075 | 0.127 | -0.259 |
| WT | -0.659 | 0.198 | 0.563 | 0.088 |
| PO ₄ -P | -0.009 | 0.934 | -0.068 | -0.077 |
| T-P | 0.095 | 0.930 | 0.222 | 0.117 |
| DTP | 0.016 | 0.907 | 0.178 | 0.116 |
| SS | 0.109 | 0.596 | 0.559 | -0.204 |
| Chl- <i>a</i> | 0.034 | 0.163 | 0.873 | -0.018 |
| COD | -0.078 | 0.370 | 0.831 | 0.112 |
| BOD | 0.335 | 0.241 | 0.726 | 0.341 |
| NH ₃ -N | 0.361 | 0.330 | -0.633 | 0.026 |
| pH | 0.314 | -0.196 | 0.556 | 0.442 |
| EC | -0.095 | 0.087 | 0.093 | 0.915 |

Table 4. Eigen values and cumulative percentage of factors

| Component | Initial eigen values | | | Extraction sums of squared loadings | | |
|-----------|----------------------|--------------|----------------|-------------------------------------|--------------|----------------|
| | Total | Variance (%) | Cumulative (%) | Total | Variance (%) | Cumulative (%) |
| 1 | 4.733 | 31.556 | 31.556 | 4.733 | 31.556 | 31.556 |
| 2 | 4.031 | 26.875 | 58.431 | 4.031 | 26.875 | 58.431 |
| 3 | 2.410 | 16.064 | 74.495 | 2.410 | 16.064 | 74.495 |
| 4 | 1.162 | 7.745 | 82.240 | 1.162 | 7.745 | 82.240 |
| 5 | 0.739 | 4.924 | 87.165 | | | |
| 6 | 0.600 | 4.001 | 91.166 | | | |
| 7 | 0.404 | 2.695 | 93.861 | | | |
| 8 | 0.293 | 1.953 | 95.813 | | | |
| 9 | 0.199 | 1.329 | 97.142 | | | |
| 10 | 0.161 | 1.074 | 98.216 | | | |
| 11 | 0.106 | 0.706 | 98.922 | | | |
| 12 | 0.080 | 0.530 | 99.453 | | | |
| 13 | 0.040 | 0.265 | 99.717 | | | |
| 14 | 0.029 | 0.193 | 99.910 | | | |
| 15 | 0.014 | 0.090 | 100.000 | | | |

and Kim, 2015)와 같이 유량의 변동에 의한 유입이 원인인 것으로 판단된다. 제 3요인은 Chl-*a*, COD, BOD 등의 유기물 항목이 주를 이루었는데, 이는 난분해성 유기물질이 포함된 하수의 유입이 원인인 것으로 사료된다.

Kim et al. (2005)의 연구에 따르면 팔당호의 수질관리를 위해서는 각 유역에 위치한 하수처리장 방류수의 관리가 필요한 것으로 언급하였으며, Hwang et al. (2016)의 연구에 따르면 팔당호의 부영양화를 결정짓는 원인으로 유역에서 발생하는 하수 처리수의 영향이 크다고 하였다. 본 연구에서도 수질에 영향을 주는 제 1요인~제 3요인은 영양염(질소, 인)과 유기물 항목이었으며 이는 상류 및 각 지천에서 유입되는 점오염원 및 비점오염원이 영향을 준 것으로 판단된다(Hwang et al., 2016; Kim et al., 2005, 2007). 따라서 각 유입지천에서 유입되는 수질 및 유량 패턴에 대한 지속적인 모니터링 및 분류에 미치는 영향평가가 필요할 것으로 생각된다.

4. Conclusion

북한강의 수질과 식물플랑크톤의 특성을 평가하기 위해 분류 및 유입지천의 수질항목 및 식물플랑크톤을 이용한 수질 평가, 식물플랑크톤 종조성 평가 및 다변량 통계분석 결과는 다음과 같다.

1) MH 지점은 BOD, COD 등 유기물질과 질소와 인 등 영양물질 농도가 매우 높게 나타났으며, 이는 목련천 상류에 위치한 주거지역과 산업시설의 영향 및 하류에 위치한 하수처리장의 방류수의 영향인 것으로 판단된다.

2) PD는 북한강의 하류로 팔당댐으로 인한 체류시간이 증가되는 지점이며 남한강이 합류되면서 다양한 식물플랑크톤이 존재하기 유리한 조건으로 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii* 및 남조류인 *Merismopedia glauca* 등과 같은 작고 증식이 빠른 조류의 영향으로 높은 세포수를 나타낸 것으로 보인다.

3) 수질인자 간의 상관분석 결과 수온과 질소화합물인 TN, DTN, NO₃-N, NH₃-N과 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 하수처리 방류수의 영향을 받은 MH 지점에서 저수온기에 높게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

4) 수질인자와 식물플랑크톤의 상관성 분석결과 BOD와 COD는 총세포수 및 각 분류군과 양의 상관관계가 있었다. 질소의 경우 대체로 규조류와 상관성을 보였으며, 인의 경우 남조류와 상관성이 있어 영향을 미치는 분류군이 상이하였다.

5) 북한강 및 유입지천 수질에 영향을 주는 주성분은 4개로 추출되었으며, 전체 분산의 82.240%를 차지하였다. 요인분석 결과 제 1요인은 TN, DTN, DO, NO₃-N, 수온, 제 2요인은 PO₄-P, T-P, DTP, SS, 제 3요인은 Chl-*a*, COD, BOD, NH₃-N, pH로 나타나 북한강 및 유입지천에서는 전체적으로 영양염류와 유기물 및 부유물질의 영향을 동시에 받는 것으로 보이며 이에 대한 관리방안이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 2018년 공공수역 녹조발생 대응 사업(NIER-2018-03-03-003)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Byun, J. H., Hwang, S. J., Kim, B. H., Park, J. R., Lee, J. K., and Lim, B. J. (2015). Relationship between a dense population of cyanobacteria and odorous compounds in the North Han river system in 2014 and 2015, *Korean Society of Limnology*, 48(4), 263-271. [Korean Literature]
- Cho, C. W., Kim, J. T., Park, J. J., and Song, J. H. (2017). A study on reuse of reclaimed water in Jeonbuk province, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(5), 237-245. [Korean Literature]
- Choi, O. Y., Kim, K. H., and Han, I. S. (2015). A study on the spatial strength and cluster analysis at the unit watershed for the management of total maximum daily loads, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(6), 700-714. [Korean Literature]
- Chung, J. (1993). *Illustration of the freshwater algae of Korea*, Academy Publishing Company, Seoul, 496. [Korean Literature]
- Gwak, B. R. and Kim, I. K. (2015). The evaluation of water quality using a multivariate analysis in Changnyeong-Haman weir section, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 29(6), 625-632. [Korean Literature]
- Gwak, B. R. and Kim, I. K. (2016). Characterization of water quality in Changnyeong-Haman weir section using statistical analyses, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 38(2), 71-78. [Korean Literature]
- Hirose, H. M., Akiyama, T., Imahori, K., Kasaki, H., Hirano, M., and Yamagishi, T. (1977). *Illustrations of the Japanese freshwater algae*, Uchidarokakuho Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan, 933.
- Hutchinson, G. E. (1967). Introduction to lake biology and limnoplankton, *A treatise on limnology*, (John W. and Sons), (2), New York, London, and Sydney, 1115.
- Hwang, S. H. and Park, J. C. (2018). Management of TOC and COD organic matter of effluents in sewage treatment plants, *Journal of Environmental Science Society*, 27(4), 261-266. [Korean Literature]
- Hwang, S. J., Kim, K. H., Park, C. H., Seo, W. B., Choi, B. G., Eum, H. S., Park, M. H., Noh, H. R., Sim, Y. B., and Shin, J. K. (2016). Hydro-meteorological effects on water quality variability in Paldang reservoir, confluent area of the South-Han River, North-Han River, Gyeongang-Stream, Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 49(4), 354-374. [Korean Literature]
- Imai, A., Fukushima, T., Matsushige, K., Kim, Y. H., and Choi, K. S. (2002). Characterization of dissolved organic matter in effluents from wastewater treatment plants, *Water Research*, 36(4), 859-870.
- John, D. M., Whitton, B. A., and Brook, A. J. (2002). *The freshwater algal flora of the British Isles*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 702.

- Kappers, F. I. (1980). The cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* Kg. and the nitrogen cycle of the hypertrophic lake Brielle (The Netherlands), *Hypertrophic Ecosystems*, (Barica, J. and Mur, L. R.), (2), *Developments in Hydrobiology*, 37-43.
- Kaviraj and Satyawati, S. (2003). Municipal soil waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworm, *Bioresource Technology*, 90(2), 169-173.
- Kim, B., Ahn, T. S., and Cho, K. S. (1988). A comparative study of the eutrophication in reservoirs of the Han River, *Korean Journal of Limnology*, 21(3), 151-163. [Korean Literature]
- Kim, J. E., Park, J. W., Jo, K. A., and Kim, S. K. (2013). Variances of environmental factors during water bloom by *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing in Ilwol reservoir, Suwon, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 46(2), 265-275. [Korean Literature]
- Kim, M. A., Lee, J. K., and Zoh, K. D. (2007). Evaluation of the Geum river by multivariate analysis: principal component analysis and factor analysis, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(1), 161-168. [Korean Literature]
- Kim, T. K., Choi, J. H., Lee, K. J., Kim, Y. B., and Yu, S. J. (2014). Study on introduction to predicting indicator of cyanobacteria dominance in algae bloom warning system of Hangang basin, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(5), 378-385. [Korean Literature]
- Kim, Y. C., An, I. S., and Kang, M. G. (2005). Survey of the secondary effluents from municipal wastewater treatment plants in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 21(2), 158-168. [Korean Literature]
- Kim, Y. H. (2010). *A study of the operation and maintenance in small scale sewage works*, Master's Thesis, Dongshin University, Naju, Korea. [Korean Literature]
- Kim, Y. Y. and Lee, S. J. (2011). Evaluation of water quality for the Han river tributaries using multivariate analysis, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(7), 501-510. [Korean Literature]
- Kong, D. S., Yoon, I. B., and Ryu, J. K. (1996). Hydrological characteristics and water budget of lake Paldang, *Korean Journal of Limnology*, 29(1), 51-64. [Korean Literature]
- Lee S. M. and Kim I. K. (2017). Analysis of correlation between cyanobacterial population and water quality factors in the middle and down stream region of Nakdong river, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 31(1), 93-101. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Annual report of national wastewater statistics 2014*, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2016). *White paper of algae in Lake Paldang*, NIER-GP2016-273, Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Park, J. H., Moon, M. J., Lee, H. J., and Kim, K. S.. (2014). A study on characteristics of water quality using multivariate analysis in Sumjin River Basin, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), 119-127. [Korean Literature]
- Park, J. S. and Rhee, K. H. (2012). Study on characteristics of water quality variation in the Yeongsan river using multivariate analysis, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 20(2), 61-72. [Korean Literature]
- Patrick, R. and Reimer, C. W. (1966). *The diatoms of the united states. exclusive of Alaska and Hawaii, Vol. 1*. The Academy of Natural Sciences, Philadelphia, 688.
- Patrick, R. and Reimer, C. W. (1975). *The diatoms of the united States. exclusive of Alaska and Hawaii, Vol. 2. Part 1*. The Academy of Natural Sciences, Philadelphia, 213.
- Prescott, G. W. (1962). *Algae of the western Great Lakes area*, Otto Koeltz Science Publisher, Gemany, 976.
- Prescott, G. W., Croasdale, H. T., and Vinyard, W. E. (1982). *A synopsis of North American desmids. Part 2. Desmidiaceae: Placodermae. Section 4*, Univ. Nebraska Press, Lincoln and London, 700.
- Prescott, G. W., Croasdale, H. T., Vinyard, W. E., and Bicudo, C. E. M. (1981). *A synopsis of North American desmids. Part 2. Desmidiaceae: Placodermae. Section 3*, Univ. Nebraska Press, Lincoln and London, 720.
- Shin, J. K., Cho, J. L., Hwang, S. J., and Cho, K. J. (2000). Eutrophication and water pollution characteristics of the Kyongan Stream to Paltang Reservoir, *Korean Journal of Limnology*, 33(4), 387-394. [Korean Literature]
- Shin, J. K., Cho, K. J., and Oh, I. H. (1999). Dynamics of water environmental factors and phytoplankton in Taechong reservoir, *Korean Journal of Environmental Biology*, 17(4), 529-541. [Korean Literature]
- Shin, J. K., Park, K. M., Hwang, S. J., and Cho, K. J. (2001). Distribution and dynamics of the total bacterial number in the Kyongan stream and Paldang reservoir, *Korean Journal of Limnology*, 34(2), 119-125. [Korean Literature]
- Song, J. J., Kim, B. B., and Hong, S. G. (2015). Study on water quality change of Yeongsan river's upstream, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 16(2), 154-159. [Korean Literature]
- Yi, D. S. and Park, K. S. (2004). Status of water pollution of Gyeongang river, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 20(6), 698-702. [Korean Literature]
- Yu, J. J., Lee, H. J., Lee, K. L., Lyu, H. S., Whang, J. W., Shin, L. Y., and Chen, S. U. (2014). Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong river, Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 47(4), 247-257. [Korean Literature]