Journal of Wetlands Research
Vol. 18, No. 4, November 2016, pp. 394-403

ISSN 1229-6031 (Print) / ISSN 2384-0056 (Online)
DOI http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2016.18.4.394

# 남한강 강천보와 이포보 건설 전·후 조류 발생의 변화에 대한 연구

**채수권·오승은·전승훈*†·안홍규****

을지대학교 보건환경안전학과
*가천대학교 조경학과
**한국건설기술연구원 수자원하천연구소

# Study on Change of Algae Occurrence Before & After Gangcheon and Ipoh Weir Construction at Namhan River

Soo-Kwon Chae·Seung-Eun Oh·Seung-Hoon Chun*† ·Hong-Kyu Ahn**

*Department of Health Environmental and Safety, Eulji University*
**Department of Landscape Architecture, Gachon University*
***Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*
(Received : 29 August 2016, Revised: 11 October 2016, Accepted: 28 October 2016)

**요 약**

본 연구는 기상과 수질 측정망 자료를 사용하여 남한강 내 강천보와 이포보가 건설되기 전·후 기상, 수질 농도, 유량 및 조류 예보 발생 패턴의 변화를 구명하기 위하여 수행되었다. 각 보의 건설 전·후의 구분은 Ward의 방법을 통한 군집분석으로 분석기간을 구분하였고, 또한 Chl-a(조류)와 기상, 수질 및 유량 등의 요인과의 상관분석을 통해 Chl-a(조류)의 발생량에 영향을 미치는 요인을 파악하였다. 2005년부터 2015년까지의 관련 자료를 기준으로 총 12개 요인(수온, 강수량, 일조시간, pH, DO, BOD, COD, T-N, $NH_3$-N, $NO_3$-N, T-P, $PO_4$-P)을 군집분석한 결과, 보 건설 전의 군집은 2006-2007년이며 보 건설 후의 군집은 2012-2013년으로 2개의 군집으로 분류되었다. 보 건설 전에 비해서 보 건설 후의 강천보 BOD는 Ⅱ에서 Ia 등급으로 개선되었고, 이포보 BOD는Ⅱ-Ⅲ에서 Ia-Ⅱ등급으로 개선되었다. 또한 전반적으로 보 건설 후에 T-P와 T-N 농도도 개선된 것으로 나타났다. 강천보와 이포보에서 Chl-a(조류) 농도는 보 건설 전보다 보 건설 후에 감소하였으나, 이포보가 건설된 후에는 보 건설로 인해 체류시간, 수온 및 일조시간이 증가하여 조류 예보 발생 횟수가 보 건설 전 9회에서 보 건설 후 15회로 증가하였다. 기상, 수질 및 유량요인과 Chl-a의 상관분석 결과, 보 건설 후 강천보에서 Chl-a는 BOD(0.579) 〉 COD(0.413) 〉 기온(0.237) 순으로 양의 상관 값이 크게 나타난 반면, $NO_3$-N(-0.344) 〉 T-N(-0.293)의 순으로 음의 상관 값이 큰 것으로 나타났다. 또한, 보 건설 후 이포보에서 Chl-a는 BOD(0.795) 〉 pH(0.581) 〉 수온(0.422)의 순으로 양의 상관 값이 크게 나타난 반면, $NO_3$-N(-0.457) 〉 T-N(-0.371) 〉 $NH_3$-N(-0.326) 〉 $PO_4$-P(-0.288) 〉 유량(-0.213)의 순으로 음의 상관 값이 큰 것으로 나타났다. 이포보의 수질이 전반적으로 개선되었음에도 불구하고 조류 예보가 발생한 횟수가 증가된 것은 보 건설에 따른 하천 수질환경 변화보다 보 건설로 인해 하천의 흐름이 변화하여 유속이 감소하고 체류시간과 수온이 증가된 영향이 큰 것으로 판단된다.

핵심용어 : 조류 발생, 보 건설 전·후, 상관분석, 남한강

**Abstract**

This study was carried out to verify change and relationship between the concentration of chlorophyll-a and environmental factors including weather, water quality and discharge at before & after Gangcheon and Ipoh weir construction at Namhan river, based on the weather and water quality data provided by the measuring network.
We classified the period of before & after weir construction by the cluster analysis with Ward's method, and also through the correlation analysis between the concentration of chlorophyll-a and environmental factors, the influence factors related with algae occurrence(Chlorophyll-a) were analyzed. The result by cluster analysis based on data of the total 12 factors (water temperature, rainfall, daylight, pH, DO, BOD, COD, T-N, $NH_3$-N, $NO_3$-N, T-P, $PO_4$-P) from 2005 to 2015 indicated a clear classification into two periods, before(2006-2007) & after (2012-2013) weir construction. After weir construction, class of BOD at Gangcheon weir was better than before, changed from Ⅱ class to Ia class, and likewise class of BOD at Ipoh weir was improved from Ⅱ-Ⅲ class to Ia-Ⅱ class. Also T-P and

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Landscape Architecture, Gachon University
E-mail: chunsh@gachon.ac.kr

T-N concentration also were to be improved in general after weir construction. Concentraion of Chlorophyll-a after Gangcheon and Ipoh weir construction was to be decreased. However, frequency of algae warning was increased from 9 to 15 after Ipoh weir construction due to increasing of HRT and water temperature. After weirs construction, the result of correlation analysis between weather, water quality and discharge and concentration of chlorophyll-a indicated a positive correlation, order of BOD(0.579) > COD(0.413) > temperature(0.237), and a negative correlation, order of $NO_3$-N(-0.344) > T-N(-0.293) at Gangcheon weir. And there were likewise positive correlation, order of BOD(0.795) > pH(0.581) > Water temperature(0.422), and negative correlation, order of $NO_3$-N(-0.457) > T-N(-0.371) > $NH_3$-N(-0.326) > $PO_4$-P(-0.288) > Discharge(-0.213) after Ipoh weir construction. Although water quality after Ipoh weir construction was generally improved, increase of frequency of algae warning occurrence was influenced by change of water conditions such as reduction of the velocity, increase of HRT and water temperature, etc impacted strongly by change of the stream flow more than change of water environments after weir construction.

Key words : Algae occurrence, Before & after weir construction, Correlation analysis, Namhan river

## 1. 서 론

남한강 하류 유역은 동경 127° 17′ 8″-127° 50′ 40″, 북위 36° 56′ 3″-37° 35′ 59″ 사이에 위치해 있는 강으로 유역면적은 2,072.72 $km^2$, 유로연장은 300.5 km이다. 남한강은 서울시의 상수원으로 2억 4400만톤을 저수할 수 있는 팔당댐과 연결되어 있으며, 팔당댐에 유입되는 하천 중 유량이 가장 많고, 팔당댐으로 유입되는 하천 중 수질오염도가 가장 높아 팔당댐 수질에 영향이 가장 큰 하천이다(Kong, 2014; Park, 2009; Shin et al., 2015).

최근 기후변화에 따른 홍수 조절 및 물 부족에 대응하기 위해 4대강 정비 사업으로 남한강 하류 유역에는 2011년에 강천보, 여주보, 이포보 총 3개의 다기능 보가 건설되었다. 이로 인해 남한강의 하천 지형 및 수리수문학적 특성이 변화하였으며, 3개의 보가 설치됨에 따라 소권역이 강천보, 여주보, 이포보를 중심으로 변경되었다. 또한, 보가 건설됨에 따라 남한강 내 체류시간이 섬강에서 강천보(11.2 km) 구간은 7.0 hr에서 17.5 hr으로, 강천보에서 여주보(10 km) 구간은 10.6 hr에서 18.0 hr으로, 여주보에서 이포보(11.8 km) 구간은 7.2 hr에서 23.0 hr으로 증가하였다. 한편, 한강은 2012년부터 수질오염총량제 대상 항목을 BOD뿐만 아니라 T-N과 T-P를 추가하여 수질오염총량제를 확대하여 시행하고 있다. 따라서 T-N과 T-P를 포함한 수질오염총량제를 시행하고 3개의 보가 건설된 남한강은 하천 내 수리수문학적 특성 변화와 하천으로 유입되는 오염부하량 변화 등에 의해서 조류가 발생하는 패턴과 조류가 발생되는 영향이 달라졌을 가능성이 존재한다(Bae et al., 2007; Kim, 2009; Kim and Jun, 2010; Kim et al., 2002; Yoo, 2013).

우리나라의 경우 하천 길이가 가장 길고 보와 댐과 같은 수공구조물이 많이 설치되어있다. 낙동강의 경우 과거 수질오염 문제가 다수 발생되었기 때문에 하천 수질 변화와 조류 발생의 특성 등이 주로 연구되었다. 하지만 남한강이 포함되어 있는 한강권역의 경우도 15년 만에 한강 내 조류 경보(Chl-a 농도 25 $mg/m^3$ 이상)가 발령되는 등 한강권역의 하천에서도 녹조로 인한 문제가 커지고 있으며, 그 중 2015년에 남한강의 조류 농도 증가율이 132%로 전국 4대강 중 가장 높은 것으로 보도된 바 있다. 또한, 한강의 조류 농도는 2015년 최악의 가뭄이 지속되면서 하천 내 유량이 감소하고 수온이 상승하여 조류의 성장여건이 잘 형성됨에 따라 발생된 조류량이 보 건설 후 3년 평균과 비교하여 2015년에 2배 이상 높아진 것으로 보도되었다(Kim et al., 2010).

조류의 증식은 하천의 수리수문학적 구조, 이화학적 수질 특성 및 기상학적 특성과 같이 복합적인 요인에 의해 발생된다. 우리나라의 경우 Chl-a와 남조류 농도로 조류 예보제를 시행하고 있으며, 남한강 하류 유역에서는 조류 예보를 강천보, 여주보, 이포보 지점에서 시행하고 있다. 녹조현상은 인체에 크게 위험하지는 않지만, 독성 남조류의 일종인 마이크로시스티스와 아나베나 등이 발생한 호수 물을 마실 경우 간 손상, 구토, 복통 등을 일으킬 수 있고, 수중 생태계를 파괴하는 문제 등을 야기한다.

본 연구에서는 기상과 수질 측정망 자료를 분석하여 2011년 남한강 하류 유역 내 강천보(Ga)와 이포보(Ip)가 건설되기 전·후 각각에 대하여 기상, 수질 농도 및 유량 변화와 조류 발생 패턴의 변화를 파악하고자 하였고, 강천보와 이포보 각각에 대하여 Chl-a(조류)와 기상, 수질 및 유량 등의 요인과의 상관분석을 수행하여 강천보와 이포보 인근에서 Chl-a(조류)의 발생량에 영향을 미치는 요인을 파악하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 분석 항목

보 건설에 따른 기상, 수질 및 조류 발생 패턴 변화를 분석하기 위해 환경부 물환경정보시스템과 수자원공사 다목적보 측정망에서 공개하는 하천수 수질측정망과 강천보와 이포보의 유량에 대한 일자료와 강천보와 이포보와 가장 근접한 곳에 위치한 이천 기상관측소의 기상 일자료를 이용하였다. Chl-a는 하천 내 존재하는 식물 플랑크톤의 분포를 알 수 있어 조류 생체량의 지표가 된다. 따라서, 강천보와 이포보 지점에서 조류 발생 경향을 분석하기 위한 조류 지표로 Chl-a를 적용하였다. 또한, 조류 발생에 영향을 미칠 수 있는 기온, 수온, 강수량, 유량, 일조시간 등과 같은 기상 및 수리학적 요인과 BOD, COD, SS, T-N($NH_3$-N, $NO_3$-N), T-P($PO_4$-P), pH, DO 등과 같은 수질 요인을

분석항목으로 하였고, 보 건설 전·후에 대해서 기상 및 수리학적 요인과 수질 요인 변화를 분석하였다.

강천보(Ga)와 이포보(Ip)에서 발생하는 조류에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 Chl-a와 기상, 수질 및 유량 요인과의 상관분석을 수행하였으며, 이 때 조류 증식에 있어 제한 영양물질을 간접적으로 평가할 수 있는 DIN/DIP와 TN/TP 비를 추가하여 상관분석을 수행하였다. DIN은 $NH_3$-N과 $NO_3$-N을 합한 총 용존성 무기질소이며, DIP는 $PO_4$-P로 총 용존성 무기인을 의미한다.

조사 기간을 보 건설 전·후 각각에 대하여 동일한 기간으로 남한강의 기상, 수질 및 조류에 대한 자료를 분석하기 위해 보 건설 전 기간은 2005-2008년, 보 건설 후 기간은 2012-2015년으로 각각 4년 동안 축적된 자료를 사용하였다. 이 때, 일관된 수질 특성을 고려하기 위해 군집분석을 수행하여 보 건설 전·후 각각에 대하여 분석 기간을 조정하였다.

### 2.2 보 건설에 따른 시간적 분류 및 상관분석

본 연구에서는 기상청과 물환경정보시스템에서 공개하는 기상, 수질 및 유량 자료에 대한 통계적 분석을 위해 SPSS(18 version)프로그램을 이용하였다. 남한강 하류에는 강천보, 여주보, 이포보 총 3개의 보가 건설되었지만, 여주보의 경우에는 보 건설 이전에 대한 수질 및 유량 자료가 없어서 인해 분석에서 제외하였다.

하천 수질은 하천유역에서 발생되는 오염부하량 뿐만 아니라 기온과 강우특성에 따라 차이가 날 수 있다. 따라서 보 건설 전·후에 기후와 수질 패턴이 유사한 분석 기간으로 구분하기 위해 수온, 강수량, 일조시간, pH, DO, BOD, COD, T-N, $NH_3$-N, $NO_3$-N, T-P, $PO_4$-P 총 12개의 요인으로 보 건설 전·후 분석 기간에 대한 군집분석을 수행하였다. 분석 기간을 군집분석으로 군집화하기 위해 일반적으로 사용되는 Ward(Ward et al., 1963)의 방법과 유클리디안 거리를 이용하였다.

강천보(Ga), 이포보(Ip)에서 보 건설 전·후 발생하는 조류 발생 패턴 변화와 조류 발생에 영향을 미치는 기상, 수질 및 유량 요인의 변화를 비교하기 위해 군집분석으로 분류된 보 건설 전·후 분석 기간에 대해 기상, 수리, 수질 및 조류(Chl-a) 농도 변화를 강천보와 이포보에서 각각 분석하였다. 또한, 조류(Chl-a)와 기상, 수질 및 유량 등의 요인을 Pearson 상관계수로 상관분석을 실시($p<0.05$)하여 강천보와 이포보 각각에 대해서 Chl-a(조류)의 발생량에 영향을 미치는 요인을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 군집분석

보 건설 전·후 각각에 대해서 기상, 수질 및 조류 발생 패턴 변화를 파악하기 위해 2005-2008년과 2012-2015년 총 8년의 데이터를 SPSS에 의해 군집분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 1과 같이 2005-2007년, 2012-2013년, 2008과 2014-2015년으로 크게 3개의 그룹으로 분류되었으나,

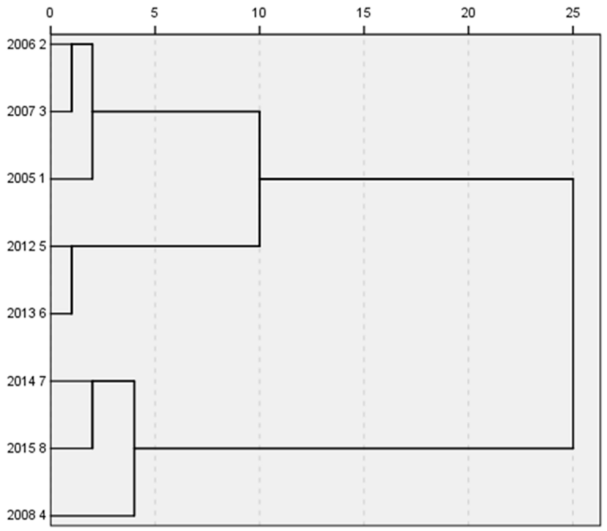


**Fig. 1.** Result of cluster analysis to classify before & after analysis period.

2006년과 2007년의 자료를 보 건설 전의 군집으로 분류하고 2012년과 2013년의 자료를 보 건설 후의 군집으로 각각 분류하였다. 이 때 기간을 동일하게 적용하기 위해 보 건설 전의 2005년과 2008년 자료를 제외하였으며, 보 건설 후 연 총강수량이 1000 mm/hr 미만으로 극심한 가뭄 특성을 나타낸 2014-2015년 자료는 보 건설 전·후를 비교하는데 부적합한 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다. 따라서, 보 건설 전·후에 대한 기상, 수질 및 조류 발생 패턴을 분석 및 비교하기 위해 보 건설 전·후 분석 기간을 각각 2006-2007년, 2012-2013년으로 설정하여 분석하였다.

### 3.2 보 건설 전·후 기상, 수질 및 유량 변화

#### 3.2.1 기온, 강수량 및 일조시간

Fig. 2와 같이 보 건설 전에 비하여 보 건설 후의 연평균을 살펴보면, 대기의 온도 즉 기온은 년 평균기온이 1℃ 저하되었고 강수량은 2mm/hr로 증가되었으며 일조시간은 1시간 증가되었다. 또한 조류예보가 발생되었던 6~9월의 일조시간은 평균 1.38시간으로 연평균에 비하여 일조시간이 길어졌다. 그리고 조류 예보가 발생되는 6-9월 월평균 기온은 20 ℃ 이상이었으며, 보 건설 전에 22.8℃에서 보 건설 후 23.5℃로 평균 기온이 0.7℃ 높은 경향을 나타내었고, 5-9월을 제외한 기간에는 보 건설 후 월 평균 기온이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 보 건설 후에 6월에서 9월까지의 기간에서 조류 예보의 발생빈도가 보 건설 전에 비해 높아질 것으로 예상된다.

갈수기인 1~4월과 10~12월의 월별 평균 강수량은 보 건설 전에 10.3(12월)~70.4(3월) mm/hr이었고, 보 건설 후에는 18.5(1월)~110.8(4월) mm/hr로 다소 증가하였으며 장마와 태풍이 지나간 10월부터 강수량이 감소하였다. 5~9월의 월별 강수량은 보 건설 전에 116.3(5월)~547.5(7월) mm/hr이었으며, 보 건설 후에는 82.7(5월)~

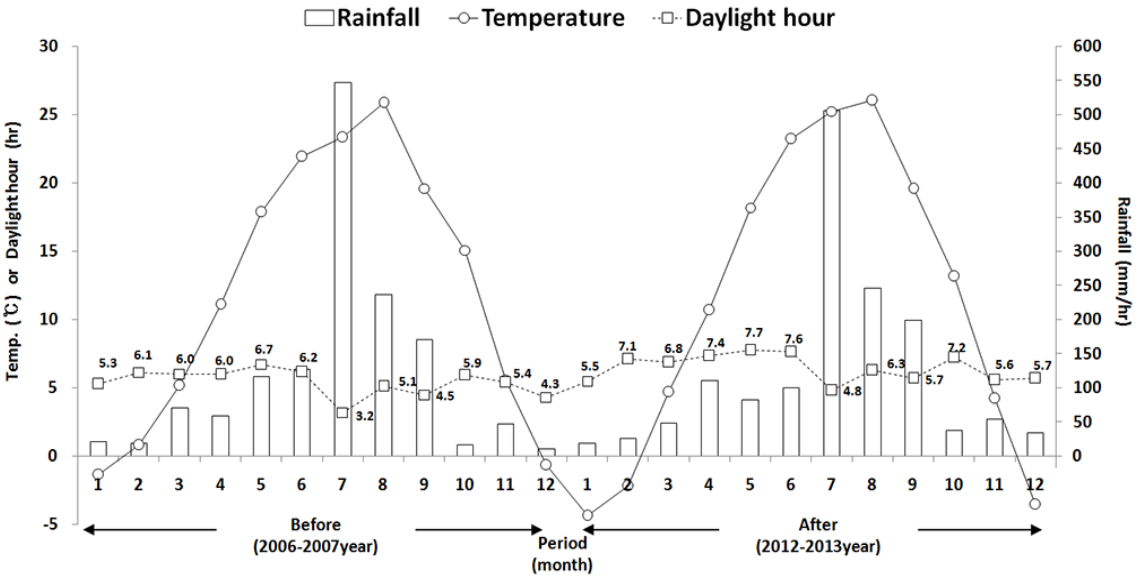


**Fig. 2.** Variation of weather characteristic in Namhan river.

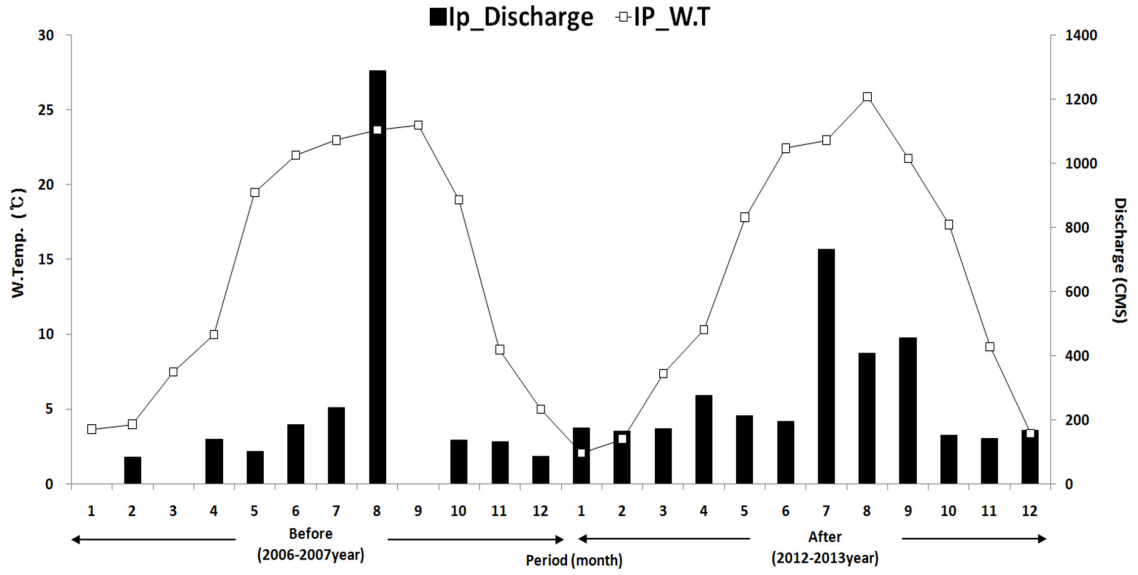


**Fig. 3.** Variation of water temperature, discharge concentration in Ipoh weir of Namhan river

506.4(7월) mm/hr로 6~9월의 평균 강수량은 보 건설 전 270.5mm/hr에서 보 건설 후 262.5mm/hr로 8mm/hr가 감소하였다. 갈수기 대부분의 월별 강수량이 보 건설 후에 증가한 반면, 장마기간이 포함된 5~7월의 강수량은 감소하여 기온에 의해 수온이 높아질 것으로 예상되고, 수온 증가에 의해 조류 예보의 빈도가 높아질 것으로 예상된다.

월별 일조시간은 해가 떠있는 시간이 긴 2-6월의 월 평균 일조시간은 6시간 이상으로 높았고, 9-1월에는 6시간 이하로 낮았다. 7-8월은 해가 긴 여름철임에도 불구하고 장마와 태풍으로 인해 일조시간이 짧았으며, 전반적으로 보 건설 전(3.2-6.7 hr)보다 보 건설 후(4.8-7.7 hr)의 월 평균 일조시간이 길어진 경향을 나타냄으로써 수온이 높아질 것으로 예상된다.

### 3.2.2 수온 및 유량

보 건설 전에 강천보 지점에서의 유량 데이터와 이포보 지점의 1, 3, 9월 유량 데이터가 존재하기 않아 이포보 지점에서 보 건설 전·후 1, 3, 9월을 제외한 기간의 유량 데이터를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 의하면 이포보의 연평균 유량은 보 건설 전에 266CMS에서 보 건설 후에 271CMS로 Kim et al. (2014)의 연구와 같이 연중 장마와 태풍의 영향이 큰 8월을 제외한 기간의 유량이 보 건설 전에 비해 보 건설 후에 약 5CMS 증가하고 월별 평균유량의 차이가 감소하였다. 이는 보 건설 후 하천 내 유량은 보 관리 수위를 일정하게 유지하고 저수용량이 커져 강우에 의한 유량 변화가 적어서 월별 평균유량의 차이가 작을 것으로 판단된다. 그러나 8월의 평균유량은 보 건설 전에

1,288CMS에서 보 건설 후에 407CMS로 881CMS가 감소하였다. 따라서 8월에는 보 건설 후에 유량 감소에 의한 체류시간 증대로 조류예보의 발생빈도가 높아질 것으로 판단된다.

Fig. 3과 같이 월 평균 수온의 경우 보 건설 전 월 평균 수온의 범위는 3.7 ℃(1월)~24.0 ℃(9월) 이었으며, 보 건설 후 수온의 범위는 2.1(1월)~25.9℃(8월)이었다. 따라서 보 건설 전에 비해 보 건설 후에는 혹한기 일수록 수온은 더 낮아졌으며 혹서기 일수록 수온은 더 높아졌다. 또한 일조시간이 길고 기온이 높은 6~8월의 평균 수온이 보가 건설된 이후 체류시간이 증가함에 따라 광량과 기온에 의한 영향으로 인해 증가하였으며, 특히 8월 수온은 23.7 ℃에서 25.9 ℃로 2.2 ℃가 증가한 것으로 분석되었다. 그리고 보의 저류능력이 증가하고 하천 내 유량이 증가하고 봄과 여름의 환절기에 속하는 5월의 평균 수온은 19.5 ℃에서 17.8 ℃로 1.7 ℃가 감소한 것으로 분석되었다. 보 건설 전·후의 동일한 5월의 평균 기온은 보 건설 전에 17.9 ℃이며 보 건설 후에는 18.2 ℃로 기온이 0.3℃ 상승하였지만, 수온이 1.7 ℃ 감소한 것은 저수량 증가로 인해 수온이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 6월의 경우 보 건설 전에 기온이 21.9 ℃이었으며 보 건설 후에는 23.2 ℃ 이었으므로 1.3 ℃가 증가하였고, 수온 역시 보 건설 전에 22.0 ℃이며 보 건설 후에 22.5 ℃ 로 0.5 ℃가 증가하였다. 이는 보 건설 후에 보의 저류량이 증가하여 5월에 기온이 수온에 미치는 영향이 적었지만, 6월에는 증가한 저류량에 지속적인 일사량이 수온에 영향을 미쳐 수온이 보 건설 후에 높아진 영향으로 인한 결과로 판단된다.

### 3.2.3 BOD, COD, SS

BOD, COD 및 SS는 전반적으로 보 건설 전·후 상류에 위치한 강천보보다 하류에 위치한 이포보 지점에서 농도가 높았으며, BOD 연평균은 강천보에서 보 건설 전에 1.3mg/L에서 보 건설 후에 0.8mg/L로 0.4mg/L가 감소하였고, 이포보에서 보 건설 전에 2.9mg/L에서 보 건설 후에 1.4mg/L로 1.5mg/L가 감소하였다. COD 연평균은 강천보에서 보 건설 전에 3.4mg/L에서 보 건설 후에 3.3mg/L로 0.1mg/L가 감소하였고, 이포보에서 보 건설 전에 5.3mg/L에서 보 건설 후에 4.3mg/L로 1.0mg/L가 감소하였다. SS 연평균은 강천보에서 보 건설 전에 20.7mg/L에서 보 건설 후에 7.1mg/L로 13.6mg/L가 감소하였고, 이포보에서 보 건설 전에 42.3mg/L에서 보 건설 후에 14.2mg/L로 28.1mg/L가 감소하였다. 따라서 보 건설 후에 BOD, COD, SS의 농도는 전반적으로 개선된 것으로 분석됐다. 이는 보의 저수기능으로 인해 하천 내 유량이 증가하여 오염물질의 희석효과와 남한강의 2015년 BOD를 기준으로 목표수질을 1.4 mg/L로 설정하고 달성하기 위한 수질오염총량제 등의 수질 개선 사업 및 정책의 영향으로 판단된다. 또한, 보 건설에 의해 하천 내 유속이 감소하여 고형물의 침전가능 시간이 길어져서 SS 농도가 감소된 것으로 판단된다(Ministry of Environment, 2014).

Fig. 4와 같이 강천보(Ga)의 경우, 보 건설 전 BOD, COD 및 SS에 대한 년 중 최대와 최소의 농도 범위는 각각 0.7(1월)~2.4(5월) mg/L, 2.4(6월)~4.6(8월) mg/L, 2.1(1월)~132.2(8월) mg/L이었으며, 보 건설 후 BOD, COD 및 SS에 대한 년 중 최대와 최소의 농도 범위는 각각 0.5(11월)~1.2(5월) mg/L, 2.4(1월)~4.4(7월) mg/L, 2.2(5월)~22.4(7월) mg/L이었다. 강천보 건설 후 BOD 농도는 3~5월을 제외하고 1 mg/L 이하로 하천수질환경기준의 Ia 등급인 것으로 분석되었다. 또한 강천보의 COD는 6월과 7월에 보 건설 전보다 보 건설 후 약 1.0mg/L 정도 증가하였고 10월에 0.5mg/L 정도 증가하였다. 나머지 개월에는 보 건설 전보다 보 건설 후에 큰 차이 없이 감소하였다.

여주시를 통과하고 인구밀집과 산업 폐수의 영향이 비교적

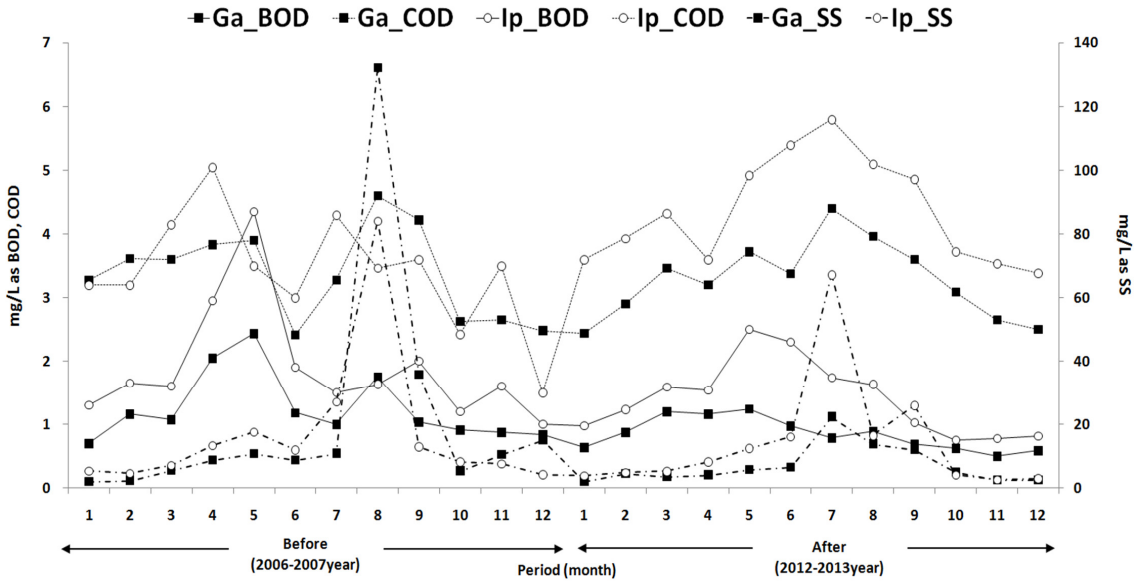


**Fig. 4.** Variation of BOD, COD, SS concentration in Gangcheon and Ipoh weir of Namhan river

큰 양화천과 복하천이 유입되는 이포보(Ip)의 경우, 보 건설 전 BOD, COD 및 SS에 대한 년 중 최대와 최소의 농도 범위는 각각 1.2(10월)~4.4(5월) mg/L, 1.5(12)~5.1(4월) mg/L, 4.2(12월)~84.0(8월) mg/L이었으며, 보 건설 후 BOD, COD 및 SS에 대한 년 중 최대와 최소의 농도 범위는 각각 0.8(10월)~2.5(5월) mg/L, 3.4(12월)~5.8(7월) mg/L, 2.7(11월)~67.3(7월) mg/L이었다. 이포보는 보 건설 후 BOD 농도는 10~12월을 제외하고 1 mg/L 이상으로 하천환경수질기준에 Ⅱ에 해당되었으나, 보 건설 후 전반적으로 BOD 농도가 개선된 것으로 분석되었다. 또한 이포보의 COD는 7월을 제외한 6월~10월에 0.1~0.6mg/L 범위로 보 건설 전보다 보 건설 후에 COD농도가 증가하였고, 4월에 5.5mg/L로 가장크게 감소하였으며 나머지 개월에는 보 건설 전보다 보 건설 후에 0.1~2.1mg/L로 감소하였다.

### 3.2.4 영양염 ($NH_3$-N, $NO_3$-N 및 $PO_4$-P)

조류는 주요 영양분으로 $NH_3$-N, $NO_3$-N를 질소(N)원으로 섭취하며 $PO_4$-P로 인(P)을 섭취한다. 따라서, $NH_3$-N, $NO_3$-N 및 $PO_4$-P와 등의 무기성 영양염류는 조류의 중요 영양분이므로 조류 증식에 중요한 요인이다 (Kim et al., 2002).

Fig. 5와 같이 $NH_3$-N에 대한 년 중 최대와 최소의 농도 범위는 보 건설 전 강천보(Ga)와 이포보(Ip)에서 각각 0.025(9월)~0.090(6월) mg/L, 0.029(9월)~0.475(4월) mg/L이었고, 보 건설 후 강천보와 이포보에서 각각 0.038(10월)~0.129(6월) mg/L, 0.046(8월)~0.354(2월) mg/L이었다. 전반적으로 상류에 위치한 강천보보다 하류에 위치한 이포보에서 농도가 높았으며, 보 건설 이후 강천보에서는 1월, 4월, 11월에 각각 0.041mg/L, 0.002mg/L, 0.004mg/L 만큼 $NH_3$-N의 농도가 감소하였고, 나머지 개월에는 0.001~0.039mg/L 범위로 증가되었다. 따라서 강천보는 보 건설 이후에 $NH_3$-N의 농도가 전반적으로 증가되었다. 보 건설 이후 이포보에서는 1월, 3월, 4월, 6월, 7월, 11월에 0.014~0.288 mg/L 범위로 $NH_3$-N의 농도가 감소하였고 나머지 개월에는 0.015~0.175 mg/L 범위로 증가되었다. 따라서 이포보에서는 $NH_3$-N의 농도가 감소된 기간이 강천보에 비해 3개월 더 길었고, 이포보는 보 건설 이후에 $NH_3$-N의 농도가 전반적으로 감소되었다.

이는 강천보 건설 후에는 저류량 증가와 체류시간이 증가하여 유입된 유기성 질소가 암모니아성 질소로 변환될 수 있지만 충분한 질산화가 진행될 정도로 강천보의 체류시간이 짧아서 강천보의 $NH_3$-N의 농도는 전반적으로 증가된 것으로 판단되며, 이포보는 저류량 증대와 같은 희석 등에 의해 감소된 것으로 판단될 수 있다.

$NO_3$-N의 농도범위는 보 건설 전 강천보와 이포보에서 각각 1.848(2월)~2.447(12월) mg/L, 1.888(5월)~3.241(11월) mg/L이었고, 보 건설 후 강천보와 이포보에서 각각 1.496(5월)~2.240(1월) mg/L, 1.920(6월)~2.633(12월) mg/L이었다. 강천보와 이포보는 보 건설 후에 $NO_3$-N의 농도는 감소하였다.

보 건설 전에 비해 보 건설 이후에 강천보에서는 3월~12월에 0.118~0.567mg/L 범위로 $NO_3$-N의 농도가 감소하였고, 1월과 2월에는 각각 0.188, 0.071mg/L 만큼 증가되었다. 보 건설 이후 이포보에서는 5월, 9월, 10월을 제외한 나머지 개월에서 0.05~1.059 mg/L 정도로 $NH_3$-N의 농도가 감소하였고 5월, 9월, 10월에는 각각 0.107, 0.016, 0.052 mg/L 만큼 증가되었다. 따라서 전반적으로 보 건설 후에 강천보와 이포보에서는 $NO_3$-N의 농도가 감소된 것으로 판단된다.

또한 강천보의 연평균 $NH_3$-N의 농도는 보 건설 전에 0.055mg/L 이며 보 건설 후에 0.065mg/L로 0.011mg/L만

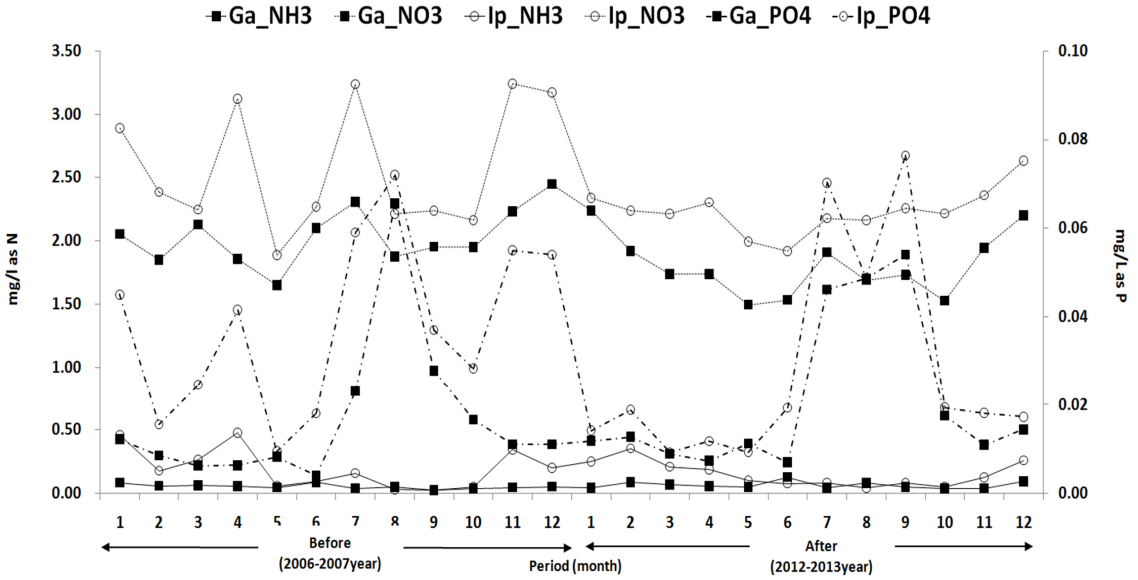


**Fig. 5.** Variation of $NH_3$-N, $NO_3$-N, $PO_4$-P concentration in Gangcheon and Ipoh weir of Namhan river

큼 증가되었고, 이포보의 연평균 $NH_3$-N의 농도는 보 건설 전에 0.196mg/L 이며 보 건설 후에 0.153 mg/L로 0.043mg/L 만큼 감소되었다. 그리고 강천보의 연평균 $NO_3$-N의 농도는 보 건설 전에 2.033mg/L 이며 보 건설 후에 1.805mg/L로 0.228mg/L만큼 감소되었고, 이포보의 연평균 $NO_3$-N의 농도는 보 건설 전에 2.589mg/L 이며 보 건설 후에 2.235 mg/L로 0.354 mg/L만큼 감소되었다.

강천보와 이포보 모두에서 $NH_3$-N보다 $NO_3$-N의 농도가 높은 것은 보 건설 후에 저류량 증가로 체류시간이 증대되면서 조류가 성장과 사멸이 동시에 진행되고 사멸된 조류의 생체에서 $NH_3$-N가 용출된 것들이 보 건설 전과 후 모두에서 질산화가 잘 진행된 것으로 판단된다. 강천보의 연평균 $NH_3$-N의 농도가 보 건설 전에 비해 보 건설 후에 증가된 것도 저류량 증가로 인한 체류시간이 증대되면서 사멸된 조류의 질소 용출로 판단될 수 있다.

$PO_4$-P의 농도범위는 보 건설 전 강천보와 이포보에서 각각 0.004(6월)~0.066(8월) mg/L, 0.010(5월)~0.072(8월) mg/L이었고, 보 건설 후 강천보와 이포보에서 각각 0.007(6월)~0.054(9월) mg/L, 0.009(3월)~0.076(9월) mg/L 이었다. 따라서 $PO_4$-P의 농도는 보 건설 후 2개 보 모두에서 감소하였다.

이는 보가 완공된 2011년부터 남한강은 수질오염총량관리제 대상지역에 포함되어서 T-N, T-P가 수질오염총량관리제를 대상 항목에 포함되도록 확대 시행하여 전반적으로 하천 내 질소와 인 농도가 감소하였고, 이포보 건설로 인하여 저류량이 증대함으로서 $PO_4$-P의 희석에 의해서도 보 건설 후 $PO_4$-P의 농도가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 T-N, T-P를 호소수 수질환경기준에 의하면, 보 건설 후의 T-N은 강천보와 이포보 지점은 모두 Ⅴ등급으로 매우 나빴고, 보 건설 후의 T-P는 강천보에서 Ⅱ~Ⅳ등급, 이포보에서 Ⅲ~Ⅴ등급을 나타내었다. 수질오염총량관리제로 전반적으로 강천보와 이포보의 질소(N)와 인(P) 농도가 감소되었음에도 불구하고 T-N와 T-P 농도는 OECD와 EU의 부영양화 기준 이상에 해당되고 있어 T-N과 T-P는 조류 생장의 제한요인으로 작용하지 못할 것으로 판단된다(Park and Cha, 2013). 따라서 조류 예경보 회수의 증가 원인이 영양염류에 의한 요인보다 기상 및 수리학적 요인으로 판단된다.

### 3.3 조류(Chl-a) 농도 및 조류 경보 발생 빈도

남한강은 강천보, 여주보, 이포보 지점에서 Chl-a 농도 기준으로 조류 예보제를 시행하고 있다. Fig. 6에 의하면 조류 생체량인 Chl-a의 농도범위는 강천보(Ga)에서 보 건설 전·후 각각 3.9(12월)~19.7(4월) mg/m$^3$, 2.2(12월)~11.6(5월) mg/m$^3$이었고, 이포보(Ip)에서 보 건설 전·후 각각 1.2(12월)~97.9(5월) mg/m$^3$, 1.5(11월)~27.0(5월) mg/m$^3$이었다. Chl-a 농도는 보 건설 전에는 하천 내 유량이 작고 온도가 증가하는 4, 5월에 농도가 높았으나, 보 건설 후 저수량 및 유량 증가와 수질 개선에 의해 Chl-a 농도가 전반적으로 감소하였다. 특히 보 건설 전 이포보 지점의 Chl-a 농도는 5월에 97.9 mg/m$^3$에서 보 건설 후에는 27.0 mg/m$^3$으로 약 3.6배 감소였으나, 보가 건설된 후 하천의 체류시간이 증가하고 길어진 일조시간과 높아진 수온의 영향으로 강천보와 이포보의 6월 Chl-a 농도는 각각 7.8 mg/m$^3$에서 9.1 mg/m$^3$, 17.3 mg/m$^3$에서 25.2 mg/m$^3$로 강천보보다 이포보의 Chl-a 농도가 증가하였다.

조류(Chl-a) 증식에 영향을 미치는 대표적인 환경요인은 광량, 유량(또는 유속), 수온 및 영양염류(N, P) 등이 있으며, 이뿐만 아니라 복합적인 환경인자들의 상호작용을 통해 성장과 소멸한다. 따라서, 조류 발생을 이해하기 위해서는 많은 자료와 다양한 분석 기법이 필요하다. 남한강의 T-N과 T-P 농도는 부영양화 상태를 유지하고 있으며, 특히 남한강 하류에

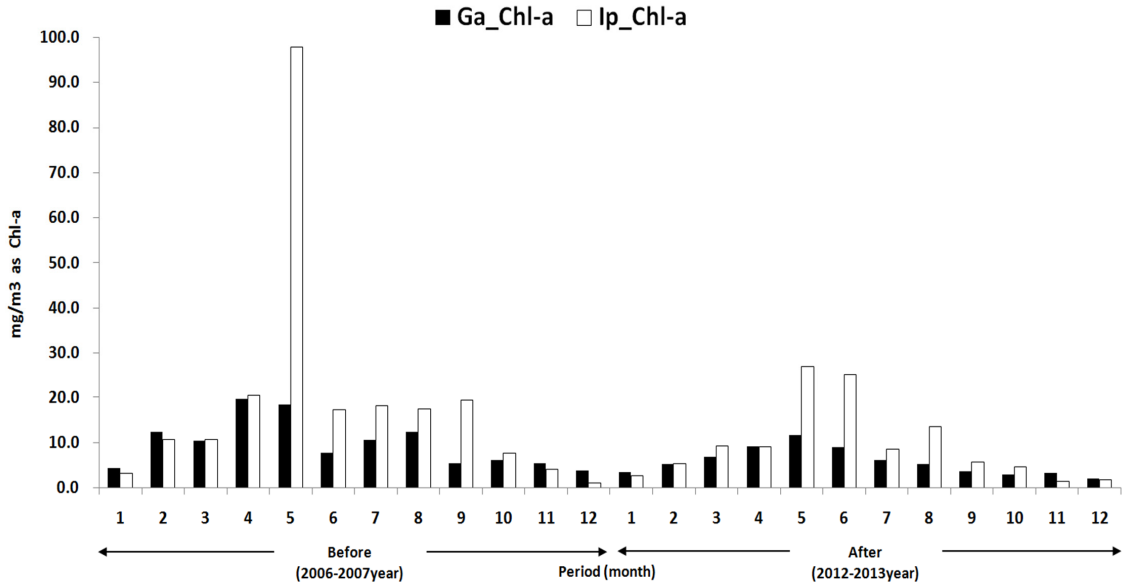


**Fig. 6.** Variation of Chlorophyll-a concentration in Gangcheon and Ipoh weir of Namhan river

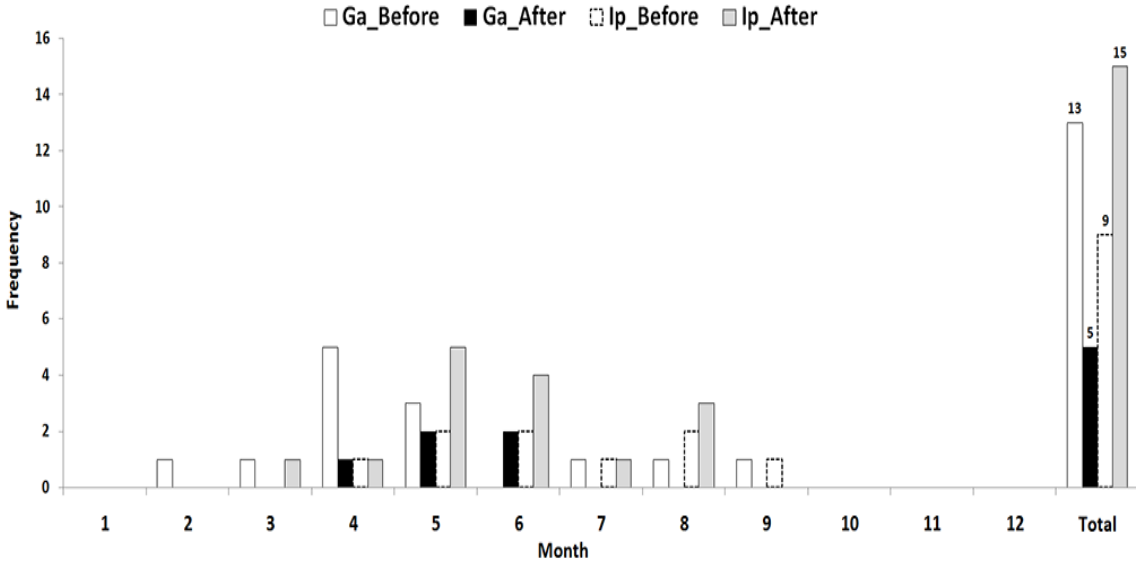


**Fig. 7.** Occurrence frequency of Algae warning system at Gangcheon and Ipoh weir depending on the weir construction before & after

위치하는 이포보는 전반적으로 강천보보다 조류 경보 횟수가 많았다(Park et al., 2012; Shin et al., 2015).

Fig. 7에 의하면 강천보에서 보 건설 전 조류 경보는 총 13회 발생하고, 보 건설 후 조류 경보 횟수가 총 5회로 감소하였다. 이는 상류에 위치하여 오염물질 유입이 적고, 하천 내 유량 증가와 수질오염총량제로 전반적으로 강천보의 수질이 개선된 영향으로 판단된다. 강천보에서 보 건설 전 조류 예보는 주로 4-5월에 총 8회 발생하였으나, 보 건설 후에는 5-6월에 총 4회 발생하여 조류 예보가 주로 발생하는 시기가 1개월 이후로 변경되었다. 이는 수질보다는 보 건설로 인해 강천보의 저수량, 유량, 수위 및 체류시간이 증가됨으로써 수온이 급격히 상승되는 시기가 4-5월에서 5-6월로 변경된 영향에 의한 결과로 판단된다.

그러나, 이포보에서는 조류 예보는 보 건설 전과 후에 주로 5-6월과 8월에 동일하게 발생하였고, 보 건설 전 조류 예보는 총 9회, 보 건설 후 조류 경보 횟수는 총 15회로 증가하였다. 이포보에서 조류 경보 횟수가 증가된 것은 인구밀집 지역인 여주시를 통과하여 생활하수의 유입부하가 크고 산업폐수의 영향이 남한강 내에서 가장 큰 양화천과 복하천이 이포보에 유입되어서 조류 경보 횟수가 증가된 것으로 판단된다. 또한, 남한강 내 새로 건설된 3개의 보 중 여주보에서 이포보 구간의 체류시간 증가율이 가장 높아 조류 경보 횟수가 증가된 것으로 판단된다.

### 3.4 Chl-a와 기상, 수질 및 유량 요인간 상관분석 결과

조류(Chl-a)는 일반적으로 수온, 유량(또는 유속), 광량, 영양염류가 적절한 수준을 만족할 경우 발생하지만, 이 4가지 요인뿐만 아니라 기상, 수리 및 수질 등 여러 복합적인 요인의 직·간접적 영향에 의해 발생된다. 따라서, 상관분석 시 상관값이 전반적으로 작게 분석되므로 상관값이 0.2 이상일 경우에 영향이 큰 것으로 판단하였다. 또한 Hyun (2014), Park et (2006) 등에 의하면, BOD와 COD 및 TOC 등과 같이 직접적인 관계가 있는 것은 상관값이 높으나, 다양하게 자연상태의 복합적 환경인자가 관여된 것들의 상관값은 0.2와 같이 작을 수 있다고 하였다. 따라서 조류도 이와 마찬가지로 유기물과 영양물질의 비율 등과 같은 수질요인과 적절한 수온과 체류시간 등과 같은 기상학적 자연요인과 하천 지리 및 수리학적 자연요인 그리고 하천 주변환경에 따른 오염물질과 영양물질의 유입 등 여러 분야에 의한 복합적인 자연현상요인들 모두들과의 상관관계를 나타낼 때 상관값이 0.2이라도 충분하다고 판단하였다. 이와 같은 상관분석을 실시한 결과로서 강천보(Ga)와 이포보(Ip)에서 보 건설 전·후에 대하여 Chl-a와 기상, 수질 및 유량 요인간 상관분석을 SPSS로 수행한 결과는 Table 1과 같다.

강천보의 상관분석을 한 결과, 보 건설 전 Chl-a는 강수량, BOD, COD, SS, T-P, DIN/DIP 비와 양의 상관성을 나타내었으며, $NO_3$-N와 음의 상관성을 나타내었다. 또한, 보 건설 후 Chl-a는 기온, BOD, COD, T-N/T-P 비와 양의 상관성을 나타내었으며, T-N, $NO_3$-N와 음의 상관성을 나타내었다.

이포보의 상관분석을 한 결과, 보 건설 전 Chl-a는 기온, 수온, BOD, T-P, DIN/DIP 비와 양의 상관성을 나타내었으며, 유량, $NH_3$-N, $PO_4$-P, T-N/T-P 비와 음의 상관성을 나타내었다. 또한, 보 건설 후 Chl-a는 기온, 수온, pH, BOD, COD, DIN/DIP 비와 양의 상관성을 나타내었으며, 유량, T-N, $NH_3$-N, $NO_3$-N, $PO_4$-P와 음의 상관성을 나타내었다.

전반적으로 강천보와 이포보의 상관분석 결과, 보 건설 이후 Chl-a와 온도(기온, 수온)의 상관성이 증가하였다. 이는 보 건설 후 하천 내 체류시간이 증가하여 수온 증가에

**Table 1.** Result of correlation analysis between Chl-a and environment factors

| Weir | Period | +/− | High correlation factors(coefficient) |
|---|---|---|---|
| Ga | Before | + | Rainfall(0.208), BOD(0.676), COD(0.354), SS(0.266), T-P(0.264), DIN/DIP(0.205) |
| | | − | $NO_3$-N(−0.365) |
| | After | + | Temp.(0.237), BOD(0.579), COD(0.413), T-N/T-P(0.219) |
| | | − | T-N(−0.293), $NO_3$-N(−0.344) |
| Ip | Before | + | Temp.(0.270), Water Temp.(0.265), BOD(0.647), T-P(0.283), DIN/DIP(0.344) |
| | | − | Discharge(−0.234), $NH_3$-N(−0.221), $PO_4$-P(−0.220), T-N/T-P(−0.299) |
| | After | + | Temp.(0.423), Water Temp.(0.422), pH(0.581), BOD(0.795), COD(0.300), DIN/DIP(0.323) |
| | | − | Discharge(−0.213), T-N(−0.371), $NH_3$-N(−0.326), $NO_3$-N(−0.457), $PO_4$-P(−0.288) |

where DIN/DIP: Dissolved Inorganic Nitrogen / Dissolved Inorganic Phosphate

영향을 미친 것으로 판단되며, 특히 체류시간이 긴 이포보 구간에서 수온에 대한 영향이 큰 것으로 분석되었다. 또한, 전반적으로 Chl-a와 BOD의 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 Kim et al. (2002)와 같이 유기물질이 유입 및 분해되면서 Chl-a의 증식에 필요한 탄소원으로 공급되었고, BOD 또는 COD는 유기물질에 해당하므로 Chl-a와 BOD 의 상관성이 큰 것으로 판단된다.

전반적으로 강천보와 이포보에서 Chl-a와 $NH_3$-N, $NO_3$-N 및 $PO_4$-P 등 영양염류의 상관값은 음의 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 Park and Cha (2013) N:P 이 16 이상 또는 미만일 경우 영양물질이 조류의 성장제한 요인으로 작용하지 못하는 것으로 알려져 있고, 남한강의 보 건설 전·후에 각각 연중 질소(N)와 인(P) 농도는 부영양화 기준 이상을 유지하고 있어 Chl-a와 영양염류간 상관성이 크게 분석되었음에도 불구하고 영양염류가 조류 성장에 영향이 작을 것으로 판단된다. 또한, 조류(Chl-a)가 수중에 존재하는 영양염류를 섭취하여 수중에 조류가 많을수록 영양염류가 감소하며, 수중의 조류가 과다하게 성장하여 충분한 영양염류가 부족할 경우 조류가 사멸하면 생체 내의 영양염류가 방출되어 수중 영양염류 농도가 증가한다. 이와 같은 이유로 인해 조류(Chl-a)와 $NH_3$-N, $NO_3$-N 및 $PO_4$-P와 같은 질소(N)와 인(P) 등의 영양염류와의 상관성은 Park and Cha (2013)과 같이 음의 상관성을 나타내는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 남한강에 건설된 강천보와 이포보를 대상으로 보 건설 전·후의 기상 및 수질 변화와 조류 발생 경향 변화를 분석하기 위해서, 기상요인(3개), 수질요인(9개) 및 유량요인과 같은 13개 요인과 Chl-a와의 상관분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 보 건설 전·후 기상, 수질 및 유량과 조류 발생 패턴 변화는 총 12개의 기상 및 수질 요인을 통한 군집분석에 의해 보 건설 전인 2006-2007년과 보 건설 후인 2012-2013년으로 군집이 분류되었다.

2) 보 건설 후 수질환경은 준설공사, 보의 저수량 증대 및 수질오염총량제 시행으로 인해 강천보와 이포보의 BOD 하천기준등급이 보 건설 전에서 보 건설 후에 각각 Ⅱ에서 Ia, Ⅱ-Ⅲ에서 Ia-Ⅱ등급으로 개선된 것으로 나타났다. 또한, 보 건설 후 강천보와 이포보의 T-P는 각각 호소기준 대비 Ⅱ-Ⅳ, Ⅲ-Ⅴ등급, T-N은 모두 Ⅴ등급으로 나타났으나 보 건설 전과 비교해보았을 때 전반적으로 T-N과 T-P 농도가 감소한 것으로 나타났다.

3) 강천보와 이포보에서 각각의 Chl-a(조류) 농도는 보 건설 전보다 감소하였지만, 체류시간, 수온 및 일조시간이 증가하여 이포보의 조류 예보 발생 횟수는 보 건설 전 9회에서 보 건설 후 15회로 증가하였으며 보 건설 후의 조류 예보 발생 시기는 대부분 5-8월이었다.

4) 기상, 수질 및 유량 등의 요인과 Chl-a와의 상관분석을 수행한 결과, 보 건설 후 강천보에서의 Chl-a는 BOD(0.579), COD(0.413), 기온(0.237)과의 순서로 양의 상관성이 컸으며, $NO_3$-N(−0.344), T-N(−0.293)와의 순서로 음의 상관성이 큰 것으로 나타났다. 또한, 보 건설 후 이포보에서의 Chl-a는 BOD(0.795), pH(0.581), 수온(0.422)과의 순서로 양의 상관성이 컸으며, $NO_3$-N(−0.457), T-N(−0.371), $NH_3$-N(−0.326), $PO_4$-P(−0.288), 유량(−0.213)과의 순서로 음의 상관성이 큰 것으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

## References

Bae, DH, Jung, II and Han, HJ (2007). *Climate change impact assessment and adaptation strategy on water resources in the Han river basin,* Gyunggi Nondan, 9, Gyunggi research institute, pp. 95-115. [Korean Literature]

Hyun, YH (2014). *Trend analysis of stream qualities in Nakdong River,* Master's Thesis, Daegu University. [Korean Literature]

Kong, DS (2014). Water quality modeling of the eutrophic

transition zone in a river-type reservoir Paldang, *J. of Korean Society on Water Environment,* 30(4), pp. 429-440. [Korean Literature]

Kim, DH (2009). Problems on the restoration of four major rivers project - focus on Yeong San river, Proceedings of the *Korean Society for Marine Environment & Energy, The Korean Society for Marine Environment & Energy*, pp. 117-122. [Korean Literature]

Kim, MS, Chung, YR, Suh, EH, and Song, WW (2002). Eutrophication of Nakdong river and statistical analysis of environmental factors, *Algae,* 17(2), pp. 105-115. [Korean Literature]

Kim, DH, Gwon, YH, Ji, SB, Lee, S and Lee, HS (2014). The data analysis change of flow rate and water level due to, Proceeding of the Conference on the *Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation,* pp. 457-457. [Korean Literature]

Kim, JS and Jun, KS (2010). Flood level mitigation effect of river dredging, *Korean society of civil engineers,* 2, pp. 139-146. [Korean Literature]

Kim, TG, Yoon, YN and Ahn JH (2002). An analysis on the changes of flow duration characteristics due to dam construction, *Water Engineering Research,* 35(6), pp. 807-816. [Korean Literature]

Ministry of environment. (2014). *Namhan river downstream water environment treatment plan,* 11-1480347-000060-01, Han River Water Shed Environmental Management Office. [Korean Literature]

Park, BJ (2009). *The study for impact of effluent quality of Paldang with four major river project*, Master's Thesis, Chungnam National University. [Korean Literature]

Park, BJ, Sung, YD and Jung KS (2006). A correlation analysis the river naturalness and water quality for biological habitat evaluation, *J. of Hydro Environment Research,* 39(8), pp. 637-644 [Korean Literature]

Park, HG and Cha, EH (2013). A study on the influence of water quality on the upper stream of Hap-Chun lake, *Korean Society of Environmental Engineers,* 30(4), pp. 429-440. [Korean Literature]

Park, HK, Kim, SH, Byeon, MS, Chun, MJ and Seo, JM. (2012). *Mechanism of algal occurrence and succession in lake Paldang - Study on spatiotemporal algal growth pattern,* 2002-30-669, NIER. [Korean Literature]

Shin, RY, Park, HK and Ryu, HS (2015). Characteristics of cyanobacterial occurrence and correlation analysis with environmental factors in the middle-downstream of Nakdong river, The Joint conference of *KSWW & KSWQ, KSWW & KSWQ*, pp. 180-180. [Korean Literature]

Shin, YS, Yu, HS, Lee, HY, Lee, DH and Park, GW (2015). The change in patterns and conditions of algal blooms resulting from construction of weirs in the Youngsan river : Long-term data analysis, *KJEE,* 48(4), pp. 238-252. [Korean Literature]

Ward, JH, Jr (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function, *J. of the American Statistical Association,* 58, pp. 236-244.

Yoo, YS (2013). *Evaluation of Chungju lake water quality using SWAT and CE-QUAL-W2 model,* Master's Thesis, Konkuk University. [Korean Literature]