

4대강 살리기 사업의 수질 개선 성과지표의 적절성 연구: 낙동강을 중심으로

Study of Effectiveness Problem of Water Quality Indicators for the
Evaluation of the Project Saving the Four Major Rivers:
An Example of Nakdong River

김용기*

Yong-Ki Kim

요약: 본 연구에서는 정부의 4대강 살리기 사업의 일환으로 추진된 낙동강 인공보 설치에 따른 수질개선 정도를 확인하고, 수질개선 성과지표 설정의 적절성에 대한 논의를 통해 향후 수질 환경정책의 개선방향을 도출하고자 한다. 조사를 위해 낙동강 인공보 설치 지역의 주요 수질 데이터들의 변화 양상을 비교 분석한 결과, 수질 지표 변화가 인공보가 설치된 지점마다 다양하게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상주보, 낙단보에서 조류대발생 지표인 엽록소 a 측정량이 인공보 설치 이후 상당히 증가된 것을 확인할 수 있었고 상대적으로 하류 지역인 합천창녕보와 창녕함안보에서는 오히려 감소한 것을 확인하였다. 또한, 4대강 사업을 통해 총인, 총질소 등 개선된 수질오염 지표들도 확인되었으나 유기탄소와 연관된 TOC, BOD 및 COD 값을 포함하여 대장균수와, 남조류 관심 경계수준 발령 횟수가 인공보 설치 이후 상당히 증가하였다. 하지만 수질 개선을 담당하는 낙동강 수계 위원회의 관련 예산은 지속적으로 증액되어왔으며 수질 개선 사업 평가 시 관련 성과지표들이 모두 100% 이상으로 성과 목표치를 상회했다는 사실을 확인하였다. 이러한 사실은 수질 개선을 위한 계획 수행단계에서의 성과 목표 설정시 유기탄소 관리 등을 위한 충분한 검토가 이뤄지지 못한 것으로 판단되며, 추후 인공보 설치에 따른 수질 개선 관련 환경정책 수립 시 다양한 수질 지표를 포함하여 오염 원인을 모니터링하고 이를 개선해나갈 수 있는 계획수립이 필요할 것으로 사료된다.

핵심주제어: 조류대발생, 낙동강, 수질 성과 지표, 수질, 환경관련 예산

Abstract: The present study aimed to verify the changes in water quality and to elicit the direction of improvement during the Project to Save the Four Major Rivers. To examine water quality improvement, this study analyzed the changes in water quality near the artificial weirs in the Nakdong River. Different patterns in the changes in water quality were found for each measurement point. There were also significant increases in several water quality indicators including total phosphorus, total nitrogen, and organic carbon-related indicators such as total organic carbon (TOC), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), the number of *Escherichia coli*, and the cyanobacterial harmful algal bloom events. However the related budget of the Nakdong River Water System Committee in charge of water quality improvement has been continuously increased and it was confirmed that all relevant performance indicators exceeded the performance target by more than 100%. These results revealed that the performance target indicators were not sufficiently reflected to the organic carbon management plan, thereby causing an effectiveness problem. Consequently, our results speculated that diverse water quality indicators should be considered when designing a future environment policy such as water quality project plan.

Key Words: Algal Bloom, Nakdong River, Performance Indicator, Water Quality, National Budget

* 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 박사 수료

I. 서론

4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강)을 체계적으로 관리하여 물부족 해결, 기후변화에 따른 홍수예방, 수질개선, 시민을 위한 다기능 복합공간 조성 및 수변경관을 활용한 지역발전에 기여하는 5대 핵심과제를 중심으로 추진된 4대강 살리기 사업은 이명박 정부에 의해 일련의 정책 절차를 거쳐 진행되어왔다(박창근, 2009; 김창수·정은정·박두호, 2012). 2018년 7월 감사원의 “4대강 살리기 사업 추진실태 점검 및 성과분석”의 ‘4대강 살리기 마스터플랜 수립과정’의 적정성(pp.35-36)에 따르면, 2008년 초 국토해양부¹⁾를 중심으로 한 한반도대운하 사업 추진 중 대운하 관련 국민 여론이 크게 악화되었다. 이를 대응하기 위해 대통령실(홍보비서관)은 맑은 물 공급·치수개선 등으로 사업 재구성이 필요할 것으로 판단하였다. 이후 이명박 대통령은 2008년 6월 국민 반대여론에 따라 대운하 사업 추진 중단을 발표하였고, 당해 년 8월말 대통령 하천정비 사업 지시에 따라 국토해양부를 중심으로 10월부터 국가하천 정비방안 마련계획에 착수하였고, 2008년 11월과 12월, 2회에 걸쳐 ‘홍수의 근원적인 방지’ 등을 목적으로 제방보강·준설 위주의 ‘4대강 종합정비방안’사업을 (예산 약 13.9조원) 수립하였다. 이에 대통령은 보 설치와 수자원 확보, 이를 위한 수심 5~6 m 굴착 등을 마스터플랜에 반영할 것을 국토해양부에 지시하였다. 이러한 일련의 절차에 따라 국토해양부는 4대강 수심확보 등은 마스터플랜 수립 시 검토하기로 하였고, 일부 지시사항을 반영하여 2008년 12월 4대강 살리기 사업을 발표하였다.

이후 4대강 살리기 프로젝트에 대한 감사원의 주요 지적 사항은 처음 대운하 사업 계획에서 논의된 사항들이 4대강 살리기 사업으로 변경된 이후 어떠한 변화가 있었는지에 대한 것들이었다. 이러한 사실은 감사원 측에서 4대강 살리기 사업을 대운하 사업의 후속으로 판단하고 있다는 것을 나타내고 있다. 4대강 살리기 사업 마스터플랜 수립당시 국토해양부는 낙

1) 현재는 국토 해양부가 분리되어, 국토 교통부와 해양수산부로 분리 됨.

동강 최소 수심을 6 m 수준으로 해야 홍수방어와 물 부족 대처가 가능하다는 전문가들의 주장을 검토하였지만, 대운하 사업 추진의 일환으로 판단될 수 있는 논란에 대응하고자 국토해양부가 계획한 최소수심 2.5~3 m 수준으로도 홍수방어와 물 부족 대처가 충분히 가능하다는 검토결과를 대통령에게 보고하였다. 하지만 마스터플랜 중간발표 전인 4월 중순에 국토해양부는 낙동강 최소수심 4~6 m, 그 외의 강은 2.5~3 m까지 준설하고, 인공보 16개 설치 등 4대 강에 7.6억 톤의 수자원을 확보하는 계획²⁾을 반영한 마스터플랜을 최종 확정하여 발표하였다(감사원, 2018).

4대강 살리기 사업 추진에 따라 5대 중점 목표중 하나인 수질개선을 위해서 환경부는 2009년 1월부터 4대강 사업의 수질개선 대책을 담당하였다. 이를 위해서 환경부는 하천의 ‘생물학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD) 기준 좋은 물(II급수) 비율’을 높이고, 총인처리시설 등의 환경기초시설을 확충하는 대책을 마련하여 이를 마스터플랜에 반영하였다(환경부, 2009).³⁾ 마스터플랜 수립 당시 법령으로 지정된 생활환경기준은 하천의 경우 BOD 등으로, 호소(湖沼)의 경우 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총인, 엽록소-*a*(조류농도) 등의 지표로 판단하는 것으로 정하고 있었다(하수도법 시행규칙 일부개정령안, 2009년 9월, 환경부). 하지만, 환경부는 2007년부터 하천에서 BOD는 좋아지고 있으나 COD와 총인 농도가 증가하고 있어 BOD 중심의 수질대책으로는 생활환경기준을 지정하는 것에 한계가 있다는 사실을 알고 인지하였으며, 이에 따라 2009년 3월 하천의 생활환경기준에 COD와 총인을 추가하였다(관련 시행령은 7월 개정). 뿐만 아니라 4대강에 보를 설치할 경우 하천의 호소화와 이에 따른 조류대발생(Algal bloom) 등 수질오염이 발생할 수 있음을 우려하였고 이를 대통령실에 보고하기도 하였다(감사원, 2018). 그럼에도 불구하고 환경부는 4대강 사업의 수질개선 목표 수립당시 하천은 BOD만을 기준으로 수질개선 목표를 정하였다. 2009년 5월 국립환경과학원(National Institute

2) 실제로는 7.2 톤 확보.

3) 이는 낙동강 수계 자금 사업의 예산 변경으로도 알 수 있다. 토지 매수 사업을 제외한 예산은 매년 증가한 것을 알 수 있다.

of Environmental Research, NIER)은 인공보 설치에 따른 수질변화를 연구하였고, 마스터플랜 상의 수질개선대책이 시행되면 BOD나 총인 농도는 좋아질 수 있으나 16개 보 구간 중 일부(9개)에서는 조류농도가 증가할 것이라 예측하였다. 그럼에도 불구하고 환경부는 같은 해 5월 22일과 7월 2일에 각각 대통령실과 대통령에게 4대강 모든 수역에서 수질이 개선(BOD 기준)될 것으로 예측된다 보고한 바 있다(감사원, 2018).

이와 같은 일련의 과정을 통해 4대강 살리기 사업이 진행되면서 여론을 통해 녹조발생 등 다양한 환경문제가 보도됐고, 부영양화 및 유해성조류대발생(Harmful algal bloom)과 관련한 다양한 연구들이 진행되어왔다(Seo, Kim and Kim, 2020; Lee, Park and Kim, 2020). 일례로, 신현주·이옥민(2014)은 4대강 살리기 사업 일환으로 만들어진 남한강 3개 인공보(강천보, 여주보, 이포보) 지역의 식물플랑크톤 군집 변동성과 생물학적 수질평가에 관한 연구를 진행하였으며, 인공보 건설 이후 총질소는 평균 2.4 mg/L, 총인은 평균 0.04 mg/L, BOD 1.1 mg/L로 수질이 ‘ 좋음 ’ 등급으로 나타났고, 식물플랑크톤의 군집 변동도 *Cyclotella* sp., *Aulacoseira* sp., 및 *Nitzschia* sp. 등의 유사 분류군이 출현하여 보건설 전후 군집변화에 큰 영향이 없다고 보고한 바 있다. 이러한 연구의 일환으로, 본 연구에서는 4대강 살리기 사업에 따른 인공보 건설이 수질 개선에 어떠한 영향을 주었는지를 다른 지역보다 다소 사업 진행이 늦춰져 왔던 낙동강에 집중하여 확인하고자 하였다. 이를 위해 인공보 설치에 따라 수질이 어떻게 개선됐는지를 살펴보고, 이 과정에서 환경부에서 추진된 수질 개선 목표 성과 지표와 수질 개선 여부 및 목표 수립이 적절하였는지에 대한 논의를 통해 추후 수질 개선 환경정책 수립시에 도움을 줄 수 있는 중요한 시사점을 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

이번 연구에서는 낙동강의 인공보 건설 이후 수질 개선 정도를 파악하

고자 하였다. 이를 위해 이중차분법(Difference-in-difference, DID)을 활용하여 보 건설이 이루어진 지점 9개와 이뤄지지 않은 지점 21개 지역의 데이터를 확보하였고, 보 건설 전후의 수질 변화를 비교 분석하였다. 총인(Total phosphorus, TP), 부유물질(Suspend solid, SS), 수온은 통제 변인으로 분석하였다. 이중차분법 분석에 활용된 데이터는 2008년 1월부터 2015년 12월까지의 월별 데이터를 부산광역시 기본 통계에서 추출되어 공개된 통계청 데이터를 활용하였고, 종속변인은 BOD, COD로 설정하여 보의 완성 시점인 2012년을 기준으로 분석을 진행하였다. <그림 1> 지도에서 나타낸 바와 같이, 4대강 정비 사업에 따라 낙동강에 설치된 보의 종류는 낙동강 상류에서 하류 순서로 다음과 같았다; 창녕함안보(경남 창녕군, 함안군), 합천창녕보(경남 창녕군, 합천군), 달성보, 강정보(이상 대구 달성군, 경북 고령군), 칠곡보(경북 칠곡군), 구미보(경북 구미시), 낙단보(경북 의성군, 상주시), 상주보(경북 상주시).

<그림 1> 대한민국 4대강과 낙동강의 보 설치 지역



①상주보 ②낙단보 ③구미보 ④칠곡보 ⑤강정보 ⑥달성보 ⑦합천창녕보 ⑧창녕함안보

〈그림 1〉 지도에서 표시된 총 8개의 낙동강 인공보 중에서 2010년 이전의 자료가 없는 ②낙단보와 ④칠곡보의 경우 이중차분법 분석 시 정책 효과를 판단할 수가 없으므로 제외하였다. 낙단보와 칠곡보를 제외하고 6개 보 근처 9개 지역⁴⁾의 수질 데이터와, 대조군의 자료로서 왜관, 성주, 현풍, 창녕, 함안천, 삼랑진, 주천강, 밀양강, 물금, 금곡, 구포, 낙동강 하구언, 형산강, 기계천, 칠성천, 덕현, 총 21개 지역의 수질을 비교 분석하였다. 비교 가능한 모든 지역의 데이터 확보를 위해 연도별 자료가 없는 지역의 경우 월별 수질 데이터를 산술평균하여 자료로 활용하였고, 연도별 자료가 존재하는 수질 데이터는 연도별 자료를 활용하였다. 이중 차분 분석을 위한 총 비교 기간은 2008년부터 2015년까지로 사업 시작 전후인 2012년도를 기준으로 비교 분석하였다. 강수량 데이터의 경우 지점별로 분석된 정확한 데이터 확보에 어려움이 있었다. 일례로 낙단보와 가장 가까운 지역의 강수량 데이터는 구미지역의 자료를 활용해야 하므로 이에 따른 정보 획득에 어려움이 있었다. 따라서 강수량 데이터는 상주보의 경우 상주, 낙단보 및 구미보는 구미, 칠곡보, 강정보는 대구, 합천창녕보는 합천, 창녕함안보는 밀양의 강수량 데이터를 각각 기상자료개방포털 사이트의 데이터베이스⁵⁾에서 얻어 활용하였다.

이러한 이중차분법은 두 집단의 유의한 차이를 비교해보는 것으로, 보통 정책 시행 전후 수혜 집단과 비 수혜 집단의 차이를 비교하는데 널리 활용되고 있다. 이중차분법을 통해 수혜자만을 대상으로 정책 수혜 전후를 비교하는 것보다 수혜자(실험집단)와 비수혜자(비실험집단)를 나누어 차이를 비교하는 것이 순수한 정책 수혜의 영향을 확인할 수 있다는 장점이 있다. 단, 통제 변인을 제대로 통제하지 못하는 경우 혹은 독립 변인들 간의 내생성을 고려한 분석 모형 설계가 뒷받침 되지 못하는 경우에는 통계적으로 유의한 값을 찾기 어려운 측면이 존재한다. 이중차분법 분석은 통계프로그램인 STATA/SE-12를 활용하여 진행하였다.

4) 상주1, 상주2와 같이 동일 지역에서도 강이나 보의 크기가 큰 경우 별도로 측정하는 지점이 존재한다.

5) <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>.

또한, 인공보 설치 전후의 수질개선 결과를 비교 분석하기 위해, 각 인공보가 설치된 지점들과 가까운 수질측정지점(상주보-상주2, 낙단보-상주3, 구미보-강정(해평), 칠곡보(왜관), 강정보(달성), 합천창녕보(합천), 창녕함안보(임해진))의 수질데이터를 국립환경과학원의 물환경정보시스템 DB⁶⁾로부터 얻었고, 기간은 2012년을 기준으로 전후 5년간(2007~2017년)의 수질데이터를 추출하여 분석하였다. 데이터 분석을 위해 각 수질측정 항목간의 인공보건설 전후 쌍체비교(t-test)를 Excel 2016 통계분석 프로그램을 활용하여 진행하였으며, 평균 수질데이터 값의 유의성 ($P<0.05$)을 검증하였다. 분석에서 달성보의 경우 2012년 전후 데이터를 얻을 수 없었으므로 인공보 설치 전후 수질분석 데이터에서는 제외하였다.

III. 연구 결과 및 논의

1. 이중차분법 분석 결과

2008년~2015년 통계청 데이터베이스인 KOSIS에서 하천수의 수질현황-낙동강 권역 데이터⁷⁾를 활용하여 BOD와 COD를 종속변인으로, 온도, 부유물질, 총인, 엽록소-*a*를 통제 변수로 이중차분법 통계분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

〈표 1〉 BOD가 종속변인인 경우 이중차분법 분석 결과

R-squared = 0.6139

bod	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
time	0.5212427	0.1058450	4.92	0.000	0.3126734	0.7298120
treated	-0.3156280	0.1267028	-2.49	0.013	-0.5652980	-0.0659582
did	0.2048546	0.1749238	1.17	0.243	-0.1398356	0.5495449
temp	0.2176237	0.0326894	6.66	0.000	0.1532087	0.2820388

6) <http://water.nier.go.kr/main/mainContent.do>.

7) http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_01_0100061.

ss	0.0000466	0.0039912	0.01	0.991	-0.0078181	0.0079113
tp	11.4647900	0.8814552	13.01	0.000	9.7278700	13.2017100
_cons	-2.6542300	0.5148240	-5.16	0.000	-3.6686990	-1.6397610

BOD: 생화학적 산소 요구량, time: 종속군, treated:처치군, DID: 이중 차분 분석을 통한 변수, temp:온도, ss:부유물질, tp:총인

먼저 BOD가 종속 변인인 경우의 이중차분법 통계분석 결과는 <표 1>과 같았다. BOD, 수온, 부유물질, 총인은 서로 통계적으로 상관관계가 있는 수치라고 알려져 있으며, 이로 인해 통제 변인으로 통제를 하여도 내생성이 발생하는 측면이 있어, *P*-value가 다소 높게 측정되는 결과가 나타났다. 따라서 내생성을 제거하여 정확한 통계적 상관관계를 파악해야 할 필요가 있으나, 보의 건설로 인한 BOD 변화의 경향성은 확인 가능하므로 본 분석 결과를 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. <표 1>에서 보이는 Coefficient 값이 0.20인 것으로 판단 시, 2012년 보 건설 전후에서 BOD 양이 상당히 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 정수현(2016)도 2004년에서 2014년 기준으로 생화학적 산소 요구량(BOD)은 보 설치 전후를 비교하여 모든 수질측정망에서 수치가 증가하였고 중·하류로 갈수록 그 차이가 심하다고 지적하였다. 이러한 결과는 낙동강 인공보 설치 이후 유기물 오염도가 상당히 증가하였다는 사실을 의미한다.

<표 2> COD가 종속변인인 경우 이중차분법 분석 결과

R-squared = 0.6165

cod	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
time	0.9118745	0.1814281	5.03	0.000	0.5543674	1.269382
treated	-0.6220903	0.2171802	-2.86	0.005	-1.050048	-0.1941331
did	0.4386171	0.2998356	1.46	0.145	-0.1521938	1.029468
temp	0.3915102	0.0560327	6.99	0.000	0.2810969	0.5019236
ss	0.0388047	0.0068413	5.67	0.000	0.0253238	0.0522855
tp	15.21544	1.510896	10.07	0.000	12.23819	18.19268
_cons	-3.171588	0.8824558	-3.59	0.000	-4.910481	-1.432694

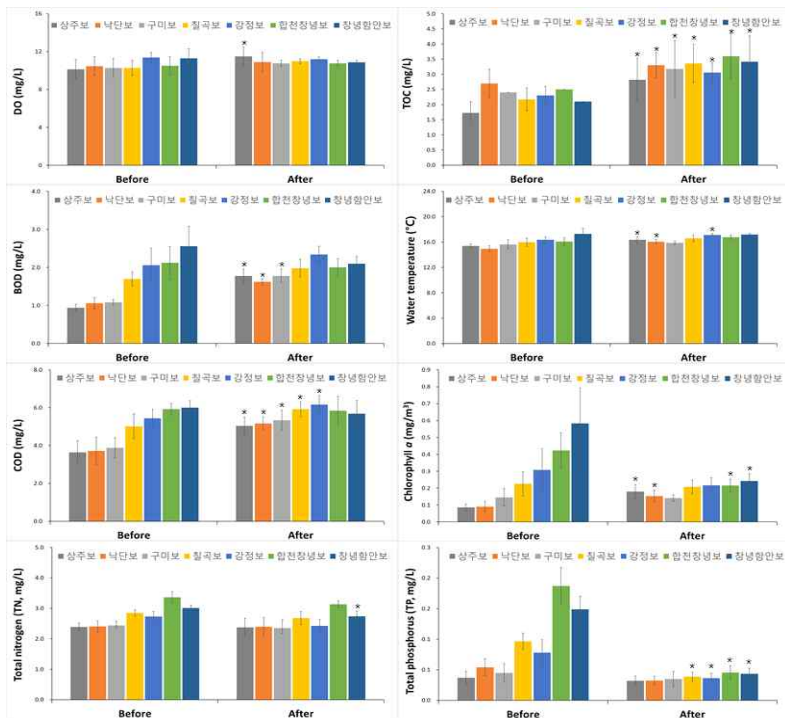
COD: 화학적 산소 요구량, time: 종속군, treated:처치군, DID: 이중 차분분석을 통한 변수, temp:온도, ss:부유물질, tp:총인

다음으로 COD를 종속 변인으로 놓고 이중차분법 분석을 수행한 결과 <표 2>에 나타난 것처럼 Coefficient 값이 BOD의 경우보다 높게 나온 것을 확인할 수 있었다. COD는 화학적 산소요구량으로 이러한 결과는 낙동강 인공보 설치 후의 수질이 생물화화학적 요소에 추가적인 처리가 필요할 정도로 오염되었음을 의미하며, 동 기간 생화학적으로 분해가 안 되어 생태계에 영향을 줄 수 있는 물질이 더욱 증가하였음을 나타내고 있다.

2. 인공보 설치 전후의 주요 수질 데이터 비교

낙동강 인공보 설치 전후의 주요 수질데이터들을 각 보가 설치된 지점별로 정리한 결과는 <그림 2>와 같았다.

<그림 2> 낙동강 인공보 지점별 설치 전후 5년간의 주요 수질데이터의 변화

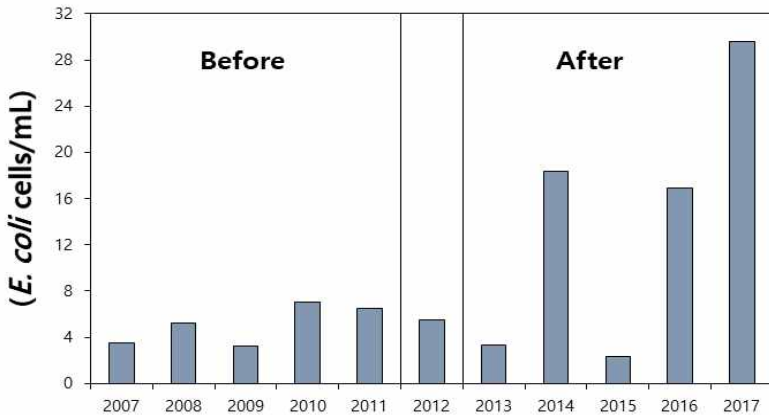


별표(*)는 P<0.05 인 값을 의미하며 쌍체비교를(t-test)를 통해 유의성을 확인함

〈그림 2〉에서 나타난 것처럼 주요 수질 지표들인 용존산소량(Dissolved oxygen, DO), BOD, COD, 총질소(total nitrogen, TN), 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 수온(water temperature), 엽록소 *a* (Chlorophyll *a*), 총인(total phosphorus, TP)의 인공보 설치 전(Before), 후(After) 5년간의 비교 결과는 인공보가 설치된 지점마다 다양하게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 특히, 데이터를 토대로 수질의 개선정도를 확인하였을 때, 상류보다 상대적으로 하류지역에 설치된 칠곡보, 강정보, 합천창녕보, 창녕함안보 근처에서 총인의 검출량이 상당히 줄어들었으므로 수질 개선이 이뤄진 것을 확인할 수 있었고, 조류대발생의 지표로 활용되는 수질 지표인 엽록소 *a* 도 별표로 표시된 합천창녕보와 창녕함안보에서는 상당히($P < 0.05$) 줄어들었다는 사실을 확인할 수 있었다. 그뿐만 아니라 총질소의 양도 하류인 창녕함안보 근처 수계에서 상당히 줄어들었다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 사실은, 총인과 총질소에 대한 수질 개선이 보 설치 이후 하류지역인 합천창녕보, 창녕함안보 등에서 상류지역보다 상대적으로 잘 이뤄진 것을 보여주고 있다. 또한, 깨끗한 물의 지표인 용존산소량의 5년간 평균치를 비교하였을 때 상대적으로 상류 지역에 설치된 상주보 근처에서 상당히 높게 나타났으며, 용존산소량만을 결과로 놓고 봤을 때 수질 개선이 되었다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 반대로 유기물의 오염지표인 BOD와 TOC의 양은 상당히 증가하였다. 특히 BOD의 경우 상대적으로 상류 지역인 상주보, 낙단보, 구미보에서 상당히 증가 되었으며 인공보 설치 전 5년 평균치보다 각각 약 1.9배, 1.5배, 1.6배 이상의 증가 수준을 보였다. TOC의 경우 모든 측정 지점에서 인공보 설치 전보다 상당히 늘어난 수치를 나타내었으며, 조류대발생 지표인 엽록소 *a*의 양도 상주보와 낙단보에서는 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 상주보, 낙단보 등 상대적으로 상류지역의 인공보 설치 지역에서 나타나는 오염 정도는 COD의 증가를 통해서도 확인할 수 있었으며, 상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 강정보에서 COD 값이 인공보 설치 전보다 상당히 증가된 수치를 나타냈다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 사실은 실제 수질개선 정도가 보가

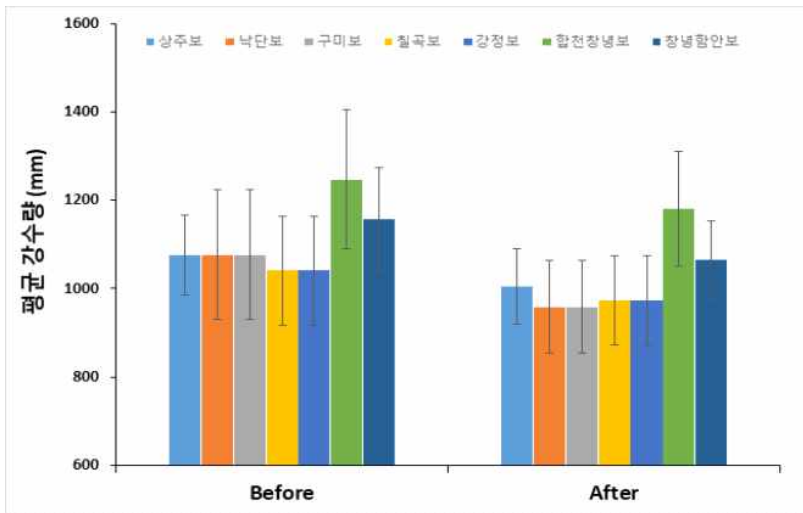
설치된 지역마다 서로 다르게 나타나고 있으며, 특히 유기 탄소의 증가양상이 뚜렷하게 나타나는 현상으로 인해 TOC, BOD, COD의 양이 상당히 높게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 유기탄소의 증가는 다양한 미생물의 증식에 큰 영향을 주며, 미세조류 및 박테리아의 성장에 특히 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되어 왔다(Chen, 1996; Perez-Garcia, Escalante, De-Bashan and Bashan, 2011; Escobar, Randall and Taylor, 2001). 따라서 물환경정보시스템의 대장균(*Escherichia coli*)의 증가 정도를 확인한 결과 <그림 3>에 나타난 것처럼 보설치 시점인 2012년에 비해 그 수가 눈에 띄게 증가하는 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

〈그림 3〉 낙동강 인공보 설치 전후 5년간 대장균(*Escherichia coli*) 세포수 변화



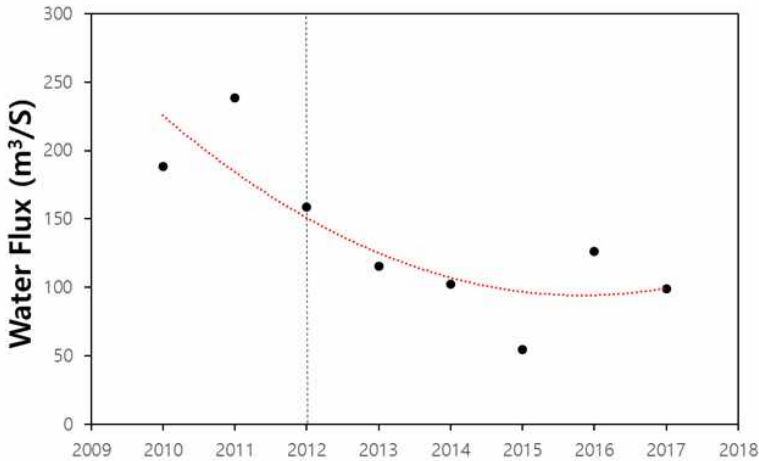
또한, 이러한 수질 데이터에 영향을 줄 수 있는 강수량의 인공보 설치 전후 변화를 살펴본 결과 <그림 4>에서 나타난 것처럼 각 지점별로 유의미하게 변화되는 강수량의 차이는 확인할 수 없었다($P>0.05$). 이러한 사실은 강수량이 TOC 등 수질 변화에 직접적인 영향을 미치지 못했다는 것을 의미하며 보설치 이후에 유기물에 의한 오염이 심각하게 증가해오고 있음을 나타낸다. 따라서 질소와 인에 대한 개선은 이루어졌지만, 유기물 또는 유기탄소에 대한 관리는 잘 이뤄지지 않았음을 보여주고 있다.

〈그림 4〉 낙동강 인공보 설치 전후 5년간의 평균 강수량 변화



유기탄소의 증가는 다양한 미생물 및 미세 조류의 증식에 영향을 줄 수 있으며, 이로 인해 BOD 및 COD를 증가시키고 수질을 악화시키는 중요한 역할을 할 수 있다. 이러한 TOC, BOD, COD의 상관관계는 이전 연구에서도 잘 설명이 이뤄진 바 있다(Dubber and Gray, 2010). 비록 낙동강 유기탄소의 증가에 대해서는 아직 연구가 많이 이뤄지지 않아 정확한 원인 규명이 필요한 실정이지만, 보설치 및 준설로 인한 유속의 감소 또한 유기탄소 축적에 영향을 주었을 것으로 추측된다. 이러한 유속의 감소는 특정지역에서의 유량(Water flux)과 큰 관련이 있으며, 따라서 유량=유속×면적으로 계산된다. 실제 낙단보 지역에서의 유량⁸⁾은 〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 2012년 보설치 이후 크게 감소했다는 사실을 확인할 수 있다.

8) 물 환경 정보 시스템(<http://water.nier.go.kr/>) 보 모니터링 낙단보.

〈그림 5〉 인공보 설치 전후의 유량(m^3/S) 비교

따라서 이러한 유속 및 유량의 변화와 낙동강 수계에서의 유기탄소 축적이 어떠한 원인으로 이뤄지는지에 대한 선행 연구를 통해 추후 하천에서의 보설치 이후 나타날 수 있는 환경정책에 반영하기 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

이러한 유기탄소, BOD, COD 등의 증가와 더불어 K-Water에서 운영하는 물정보포털(My Water)⁹⁾의 조류경보제와 수질 예보제 자료를 기반으로 2010년부터 2016년 기간 동안 남조류(Cyanobacteria) 번식을 확인한 결과는 〈표 3〉과 같았다. 여기서 남조류는 우리가 흔히 알고 있는 녹조대발생을 일으키는 대표적인 분류군이며, Microcystin 및 Anatoxin 등의 독성 물질을 분비하는 마이크로시스티스(*Microcystis*), 아나베나(*Anabaena*) 및 아파니조메논(*Aphanizomenon*)과 같은 유해성 남조류 속을 포함한다. 이러한 유해성 남조류의 세포 개수에 따라서 조류경보제 발령 수준이 결정되며 채수된 샘플의 10^4 cells/mL 이상을 조류경보제의 관심 경계수준으로 판단한다(김석구, 2017).

9) <https://www.water.or.kr/disaster/safety>.

〈표 3〉 남조류 세포가 관심 경계수준(1만 세포/mL 이상) 이상 발생한 일수

지점	2010년	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년
상주보	0	0	0	0	0	12	15
낙단보	0	0	7	4	0	33	8
구미보	0	0	8	17	0	48	6
칠곡보	0	0	15	6	20	63	11
강정보	0	0	6	9	69	62	6
달성보	0	0	1	38	59	111	37
합천보	0	0	22	34	80	138	66
함안보	0	0	21	31	65	145	68
평균	0	0	10	17.3	36.6	76.5	27.1

조사결과 위의 〈표 3〉에서 보이는 것처럼 남조류 세포가 관심 경계수준으로 발생한 일수는, 2012년 이후 급격하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 남조류의 대발생 원인은 수온, 강수, 비점오염원의 영양염류 유입, 생물학적 상호작용 등 다양한 요인으로 발생하지만, 주로 질소, 인, 철 및 유기물 등의 영양염류 체류시간, 기상 조건, 유속 등에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Paerl, Gardner, McCarthy, Peierls and Wilhelm, 2014; Glibert et al., 2004; Romo, Soria, Fernandez, Ouahid and BARÓN-SOLÁ, 2013; Ahn, Chung and Oh, 2002). 류성훈·이인철·장태영·김경희(2015)는 인공보 건설로 인해 약 4억 톤에 달하는 준설이 실시 되면서 지형적 체적증가에 따른 외부 오염부하에 대한 완충 능력이 증가되는 효과를 보였지만, 이로 인한 체류 시간의 증가는 부영양화에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 하였으며, 특히, 낙동강의 경우 상류에서 생활하수, 점오염원 및 비점 오염의 영향을 받고 중류에서는 공업단지의 처리된 폐수들이 유입하므로, 하류에서는 정체 수역으로 인한 조류 및 수질 악화가 심각하다고 이야기하였다. 따라서, 인공보 건설로 인한 물의 체류 시간 증가와 유기탄소의 부영양화가 박테리아뿐만 아니라 유해성 남조류 번식에도 큰 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 이러한 보설치 이후 조류 발생의 변화에 관한 연구는 남한강에서 전승훈·채수권·오승은·안홍규(2016)에 의해서 진행된 바 있으며, 남한강의 이포보 건설 이후 체류 시간, 수온 및 일조시간 증가에 따라 조류 예보 발생 횟수가 증가했다고 보고한 바 있다.

3. 낙동강 수계 기금의 수질개선 목표 및 지표의 적절성

위 서론에서 설명했듯이, 낙동강의 인공보 건설 사업은 ‘4대강 정비 사업’으로 국토 해양부 및 4대강 살리기 추진 본부에서 진행한 사업이지만, 실질적인 낙동강의 관리시스템은 환경부에서 진행되어 왔으며, 환경부 산하의 ‘낙동강 수계 관리 기금’에서 진행되어 왔다. 낙동강 수계 기금은 2002년 7월 15일에 설치되었으며, 설치 목적은 낙동강 수계 수자원과 오염원을 적정하게 관리하고 상수원 상류지역 수질 개선 및 주민 지원 사업을 효율적으로 추진하여 낙동강수계의 수질을 개선하기 위함이다(환경부 낙동강유역환경청, 2021). 이러한 기금을 이용한 주요사업은 주민지원사업, 환경기초시설의 설치 및 운영사업, 토지 등의 매수사업 및 수변녹지조성사업, 기타수질개선지원사업, 오염총량관리사업 및 수계관리위원회 운영경비(기금운영비) 등으로 구성되어 있다.

먼저 주민지원사업의 경우 상수원관리지역 지정으로 재산권 행사 등에 제약을 받고 있는 주민들의 생활환경 개선과 소득 수준 향상 등의 직·간접적인 주민지원 사업을 통해 상수원 수질보전 정책에 대한 지역주민의 적극적인 협조와 참여 유도하는 사업이며, 지원대상은 상수원관리지역 및 댐 주변지역 또는 그 지역의 주민이다. 환경기초시설의 설치 및 운영사업은 재정이 열악한 지방자치단체의 지방비 부담분 일부를 기금으로 지원하여 환경기초시설 조기 확충을 유도하고 직접적으로 수질오염방지 및 낙동강 수질개선에 기여하는 것을 목적으로 진행된 사업이며 국고가 보조되는 공공하수처리시설, 분뇨처리시설, 가축분뇨공공처리시설, 하수관로 설치사업의 지방비 부담분 중 일정비율을 재정자립도 등을 고려하여 지역별로 구분하여 기금을 지원한다.

토지 등의 매수사업 및 수변녹지조성사업은 상수원 수질에 영향이 큰 상수원 상류지역 토지 등을 직접 매수 및 오염원을 제거하여 수질오염을 유발하는 토지이용을 사전 예방 및 수질개선을 위한 목적으로 진행된 사업이며, 낙동강의 수질보전을 위하여 상수원관리지역, 상수원보호구역, 수변구역 및 환경부령이 정하는 지역의 토지와 시설물을 매입하고, 낙동

강수계 매수 토지를 대상으로 수변생태벨트 조성을 통해 비점오염물질이 직접 수계로 유입되는 것을 예방하고 자연정화기능 증대를 통해 낙동강수계 상수원 수질개선을 도모한다. 사업내용은 매수한 토지에 수변생태벨트 수목식재 습지조성 등 수변생태벨트를 조성하기 위한 공사비 및 수변녹지 조성지역의 사후관리를 위한 사업비로 이용된다.

기타수질개선지원사업은 낙동강 원수를 취수하는 상수원관리지역, 상수원보호구역 및 수변 구역의 관리비용 일부를 지원하여 상수원 수질개선을 목적으로 진행된 사업이며, 사업내용은 지자체의 상수원관리지역 관리를 위한 인건비 시설 및 장비 표지 초소 등 설치비 개보수 등 유지관리비 및 오염행위 감시를 위한 경비 지원 등을 포함한다. 세부사업 중 비점 오염 저감사업(2009년 시작, 비점오염관리대책지역 축산단지 하류지역 도시지역 등의 비점오염물질 유출 저감 및 제거를 위한 습지 등 시설 설치비 지원, 국고 지원이 확정된 사업에 대해 지방비 부담분의 일정비율 지원), 하천하구쓰레기정화사업(2015년 시작, 유역의 상수원댐 상류와 하천변 등에 방치 산재된 쓰레기를 장마 태풍 등 집중호우 전 후에 신속하게 수거 처리 인건비 처리비 수거차량 임차비 등 지원비율 국고 지원이 확정된 사업에 대해 지방비 부담분의 40% 지원)이 대표적이나, 사업의 시작시점이 늦고, 투입 예산이 적은 관계로 본 분석에서는 제외하였다.

그 밖에 오염총량관리사업은 수질오염총량관리계획을 수립 시행하는 지자체의 시행계획 수립 및 이행 평가에 소요되는 비용, 오염총량관리 배출 삭감시설 모니터링 비용 등 지원하는 사업이며, 수계관리위원회 운영 경비 지원사업은 낙동강수계관리위원회 운영 및 개 광역시 도의 기금업무에 소요되는 경비를 지원하여 기금관리의 효율적 운영을 도모하고, 기금의 효율적 관리를 위한 회계직 사무보조 등의 인건비 등으로 사용되는 사업이다(환경부 낙동강유역환경청, 2021).

본 연구에서 진행한 이중차분법 분석, 인공보설치 전후의 수질분석, 조류경보발생 일수의 증가 수준으로 판단하였을 때, 낙동강의 인공보 설치 이후 총인과 총질소에 대한 수질개선은 확인되었지만, 유기탄소의 관리

미비로 인해 일부 인공보 설치 지역에서 BOD, COD와 TOC 및 남조류 경보횟수가 상당히 증가했다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, <표 4>에서 나타낸바와 같이 각 항목별 낙동강수계관리기금 관련 사업의 예산은 지속적으로 증가되어 왔다(낙동강수계관리위원회, 2018).

〈표 4〉 2008-2015년 낙동강 수계 기금 세부 사업별 예산 변동 내역

(단위, 억원, 년)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
주민지원사업	271	270	271	272	271	272	265	288
환경기초시설	1,000	1,079	1,375	1,475	1,289	1,322	1,261	1,421
기타수질개선	84	97	96	100	90	141	156	140
토지매수사업	445	438	181	216	368	364	351	359
오염총량관리	44	41	44	53	56	75	58	72
기금운영비	28	30	31	34	33	33	33	35

물론, 이러한 예산변경 항목들 중 토지매수사업의 경우 수변 지역 및 상수원 지역의 토지를 국가가 개인이나 기관으로부터 매수하는 사업이므로, 예산을 집행하는 과정에서 매수가 실패하거나, 매도자에게 맞는 가격을 제시 못하는 상황이 발생하여 불용 처리되는 경우가 종종 발생한다. 더불어, 사업기간이 길어서, 당해년도에 예산을 이용하여 철거, 녹지 조성, 등을 진행하기 어렵다고 볼 수 있다. 하지만 이번 연구를 통해 인공보가 설치된 각 지점별로 주요 수질 지표들의 악화가 뚜렷이 관찰되었고, 남조류의 대발생 빈도수 및 세균 번식이 증가되어 수질오염 문제가 인공보 설치 이후 발생했다는 사실을 확인할 수 있었으며, 사업의 각 항목별로 전반적인 수질개선사업에 투입된 예산 대비 실효성 있는 성과를 거두었는지는 구체적이고 세부적인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 이러한 분석을 위해 위에서 실시한 이중차분법 분석과 더불어 구체적인 성과계획서에 관한 내용 검토를 진행하였다. 현재 대한민국 53개 부처의 모든 단위사업은 사업의 내용이 인건비, 경상비, 교육비 등의 운영비 명목이 아닌 사업예산의 경우 1년간의 성과를 측정할 수 있는 성과지표를 설정해야

하며, 이는 정부부처들이 다음 회계연도의 성과지표를 직전년도 6월~8월의 기간 성과 계획서 검토를 통해 작성하는 것으로, 성과 측정 당해 연도 이후 보고서를 통하여 목표치 대비 실적의 달성률을 기준으로 성과 보고를 하게 된다. 이러한 절차는 다음연도 예산 반영에 중요한 참조자료로 활용되며, 예산을 받아 진행되는 사업의 연간 실적을 측정하는 데 있어 중요한 척도로 사용된다.¹⁰⁾

2008년부터 2015년까지의 낙동강 수계 기금의 성과 지표 (수질 관련)의 성과 지표의 목표치, 실적치, 달성률의 현황¹¹⁾은 <표 5>와 같았다.

<표 5> 2008년~2015년 기간 동안의 성과 지표 달성률 현황

성과지표명		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
년간 투입예산 당 오염물질 저감량(톤/억원)	목표	303.2	304	305	.	.	.	.	.
	실적	335.2	421.2	423.8	.	.	.	.	.
	달성률	110.6	138.6	138.9	.	.	.	.	.
기금지원환경기초시설오염물질삭감량 (kg/년)	목표	116.8	120.5	122.3	.	.	.	.	.
	실적	129.7	145.4	163.4	.	.	.	.	.
	달성률	111	120.7	133.6	.	.	.	.	.
오염부하량할당시설의할당부하량준수율(%) -(오염부하량할당시설의 할당부하량 준수여부 지도·점검시설 대비 준수시설)*100	목표	.	.	60	70	.	.	.	.
	실적	.	.	100	97.9	.	.	.	.
	달성률	.	.	166.7	139.9	.	.	.	.
기금으로 운영비가 지원되는 환경기초시설의 오염물질 삭감량(천톤/년) =(유입부하량-방류부하량)	목표	.	120.5	178	182	178	188	189	191
	실적	.	122.3	181.4	182.4	181.4	188.5	196.2	191.9
	달성률	.	101.5	101.9	100.2	101.9	100.3	103.8	100.5
오염총량관리단위유역목표수질달성율(%) -수계내단위유역 ¹²⁾ (41개)중평가수질 의목표수질달성(비율)	목표	.	.	.	.	.	.	78.2	80.7
	실적	.	.	.	.	.	.	85.4	87.8
	달성률	.	.	.	.	.	.	109.2	108.8
총량협의사업장삭감계획이행율(%) -전년도준공된개발사업장중총량협의 (삭감계획)이행사업장수(비율)	목표	.	.	.	.	.	.	75	78
	실적	.	.	.	.	.	.	76.4	79.5
	달성률	.	.	.	.	.	.	101.9	101.9

10) 환경예산과 예산제도(환경부 기획재정담당관실, 2016).

11) 환경부 성과 계획서 2008년~2015년 저자 재구성.

12) 수계내 단위구역 41개 - 부산 2곳, 경남 12곳, 경북 19곳.

〈표 5〉에서 제시된 6개 지표들은 연간 투입예산 당 오염물질 저감량(톤/억 원), 기금지원환경기초시설 오염물질 삭감량(kg/년) 등을 포함한 6개의 항목으로 구성되어 있으며 2008년부터 성과 목표 대비 달성율이 모두 100%를 상회하고 있는 것을 확인할 수 있다. 물론, 오염물질 저감량을 목표로 설정하여 이를 체계적으로 수행하는 것은 수질 개선에 상당한 도움이 될 것으로 사료되며, 몇몇 인공보 설치 지점에서 실제 총질소와 총인의 개선 효과를 나타내었다는 사실을 확인할 수 있었으나, 이종차분법 분석 결과와 남조류 대발생 빈도수 및 인공보설치 전후 수질개선 데이터에 따르면, 낙동강에 인공보 건설 이후 TOC 증가 등에 의해 BOD와 COD 등이 크게 악화된 것으로 판단되며 이로 인한 유기탄소 부영양화가 심각하게 진행되었다. 그럼에도 불구하고, 관련된 사업의 성과지표 달성률이 100%라는 사실은 실질적인 수질개선과 관련된 성과지표 설정시 부족한 부분이 존재할 가능성을 나타내고 있다. 또한 대다수의 성과 지표들이 투입 예산 당, 기금 지원을 받은 시설의 삭감량, 기금으로 운영되는 환경 기초 시설의 오염 물질 삭감량 등의 형태를 지니고 있다. 즉, 투입 예산이 증가하면 관련된 산출물이 증가하는 형태의 투입 및 산출 지표의 형태를 가지고 있다.

하지만, 이러한 오류 발생 가능성에도 불구하고 〈표 4〉에서 보이는 것처럼 각 세부사업 항목별 국가 예산은 지속적으로 증액됐으므로, 녹조대발생 등으로 많은 언론의 주목을 받는 상황과 더불어, 추후 실효성 없는 사업에 국가 예산을 낭비하였다는 비판에 직면할 가능성이 존재한다. 이러한 사실들을 토대로 본 연구에서는 그동안 실질적인 수질 개선 실효성이 부족한 성과지표 설정을 유기탄소관리를 포함하여 체계적으로 개선하고, 주기적인 수질데이터 모니터링과 TOC의 증가 원인을 정확하게 밝혀내는 작업을 진행하는 등 적극적인 수질개선 성과 목표가 수립되어야 함을 강조하고자 한다. 특히, 사회적 문제가 되고 있는 남조류 대발생의 빈도수 문제를 일으키는 부영양화현상을 줄이기 위한 성과목표 설정 또한 필요할 것으로 판단되며, 이를 통해 국민 건강 개선을 위해 노력해나가야 할 것이다.

IV. 결론 및 제언

이번 연구에서는 4대강 살리기 사업의 일환으로 추진된 낙동강 인공보 건설 사업이 설치구간의 수질개선에 어떠한 영향을 주었는지에 대하여 공개데이터를 활용하여 분석을 진행하였다. 이후 다양한 수질 지표들의 인공보 설치 전후 비교를 통해 낙동강 수계기금의 연간 예산 변동과 수질 관련 성과지표의 적절성 여부를 검토하였다.

이번 연구를 통하여 낙동강의 인공보 건설 전후 BOD, COD 및 TOC 변화량은 인공보 설치 지점마다 다양하게 나타났지만, 기존보다 증가된 경향성을 나타낸다는 사실을 확인 할 수 있었다. 또한, 총질소 및 총인 등의 주요 수질 지표들의 개선이 이루어진 특정 지점들을 확인할 수 있었던 반면, 동 기간의 남조류 대발생 빈도가 인공보 설치 이후 다소 증가된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 인공보 설치 이후 전반적인 수질 개선을 위해서 TOC, 남조류 대발생 등의 관리방안 등에 대한 지표 설정이 추가적으로 필요함을 확인할 수 있었다. 또한, 낙동강 수계기금의 6개 성과지표의 달성률을 검토한 결과는 수질 개선의 직접적인 효과를 위한 정책설정이 필요하다는 사실을 시사한다. 이러한 사실은 사업별로 투입된 예산대비 산출지표의 형태를 벗어나기 어려운 사업의 한계점 및 사업의 효과가 나타나는 시기의 적절함이 충분히 고려되지 않기 때문으로 판단할 수 있다. 하지만, 수질 개선에 해당하는 평가 지표의 명확한 기준과 동사업을 통한 개선된 성과 목표가 적절하게 제시되지 못했기 때문이라 판단된다. 추가로, 생활환경개선 기준으로 BOD, COD, 총인, 부유물질, TOC 등의 전체적인 수질지표들을 포함하지 않고, BOD만을 기준으로 설정한 것은 수질 개선 정도를 정확하게 평가하기 어려울 수 있다고 판단된다. 본 연구는 수질 개선이라는 목표 달성 과정에서 사업계획의 수립뿐 아니라 고유 사업의 수행에 해당하는 모니터링과 평가의 과정에서 정부 부처, 전문가 및 정책 수립자들 간의 심층적인 토론의 필요성을 다시 한번 고찰시켜준다. 물론, 이번 연구는 저수량, 일조량 등의 기상 조건, 비점오염원 등의 다양

한 항목들을 포함 시키지 못한 한계점이 존재하지만, 향후 수질 개선과 관련하여 정부 부처, 환경단체, NGO 등 다양한 분야의 환경 정책 전문가들의 의견을 수렴하고, 수질 개선 지표 항목들의 정확한 모니터링과 실효성 있는 성과 항목 관리가 정책수립 및 사업 계획시에 중요하다는 점을 시사해주고 있다. 여기에는 사업수행 및 수행 과정에서의 적정한 평가를 통한 결과를 사업의 계획과 수행 과정에 환류하여 기존에 수립한 사업의 목적 달성을 용이하게 하는 과정 또한 포함하고 있다. 더불어, 향후 인공보 설치 전후의 장기 모니터링 결과와 비점오염원의 발생 여부, 다양한 기상환경, 수문학적 요인들에 대한 상관관계에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이와 함께, 앞서 언급한 바와 같이 낙동강 수질 오염과 관련하여 인공보 설치 후 보의 수문 개방에 관련한 지역 생태계 변화 및 보의 수위 조정으로 인한 수질 및 생태계 변화에 대한 보다 심층적인 연구가 필요하다. 이를 얻어진 결과를 토대로 정책 수립이 필요하며 수립된 정책의 영향에 관해서도 심층적인 연구와 평가가 필요할 것으로 사료된다.

■ 참고문헌 ■

- 감사원, 2018, 『4대강 살리기 사업 추진실태 점검 및 성과분석 - 주요 감사결과 및 성과 분석 결과』, 서울: 감사원.
- 김석구, 2017, "녹조와 조류경보제," 『물과 미래』, 50(7), pp.22-26.
- 김창수·정은정·박두호, 2012, "4대강 관광 및 레저사업 성과 분석," 『관광경영연구』, 16(4), pp.93-115.
- 낙동강수계관리위원회, 2018, 『낙동강수계관리기금 통계(2002-2017)』, 창원: 낙동강수계관리위원회.
- 류성훈·이인철·장태영·김경희, 2015, "낙동강 유역 보 건설로 인한 수질환경 변동특성 분석," 『한국해양환경·에너지학회 학술대회논문집』, 경상대학교 통영 캠퍼스, pp.16-20.
- 박창근, 2009, "녹색성장 정책과 4 대강 살리기 사업의 문제: 토목공학의 관점," 『경제와 사회』, 83, pp.117-142.
- 신현주·이옥민, 2014, "남한강 3개 인공보의 식물플랑크톤 군집 변동과 생물학적 수질 평가," 『한국물환경학회지』, 30(6), pp.612-621.

- 전승훈·채수권·오승은·안홍규, 2016, “남한강 강천보와 이포보 건설 전·후 조류 발생의 변화에 대한 연구,” 『한국습지학회지』, 18(4), pp.394-403, DOI: 10.17663/JWR.2016.18.4.394.
- 정수현, 2016, “4대강 사업 후 수질변화 분석 낙동강 4개 인공보 중심으로,” 『2016년 한 국환경정책학회 춘계학술대회 요약집』, 서울대학교 환경대학원, pp.55-56.
- 하수도법 시행규칙, 2019, 환경부령 제833호.
- 환경부, 2007, 『2008년 환경부 성과 계획서』, 과천: 환경부.
- _____, 2008, 『2009년 환경부 성과 계획서』, 과천: 환경부.
- _____, 2009, 『2010년 환경부 성과 계획서』, 과천: 환경부.
- _____, 2010, 『2011년 환경부 성과 계획서』, 과천: 환경부.
- _____, 2011, 『2012년 환경부 성과 계획서』, 과천: 환경부.
- _____, 2012, 『2013년 환경부 성과 계획서』, 과천: 환경부.
- _____, 2013, 『2014년 환경부 성과 계획서』, 세종: 환경부.
- _____, 2014, 『2015년 환경부 성과 계획서』, 세종: 환경부.
- _____, 2015, 『2016년 환경부 성과 계획서』, 세종: 환경부.
- 환경부 기획재정담당관실, 2016. 『환경예산과 예산제도』, 세종: 환경부.
- Ahn, C. Y., A. S. Chung, and H. M. Oh, 2002, “Rainfall, phycocyanin, and N: P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir,” *Hydrobiologia*, 474(1-3), pp.117-124, DOI: 10.1023/A:1016573225220.
- Chen, F., 1996, “High cell density culture of microalgae in heterotrophic growth,” *Trends in Biotechnology*, 14(11), pp.421-426, DOI: 10.1016/0167-7799 (96)10060-3.
- Dubber, D. and N. F. Gray, 2010, “Replacement of chemical oxygen demand (COD) with total organic carbon (TOC) for monitoring wastewater treatment performance to minimize disposal of toxic analytical waste,” *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 45(12), pp.1595-1600, DOI: 10.1080/10934529.2010.506116.
- Escobar, I. C., A. A. Randall, and J. S. Taylor, 2001, “Bacterial growth in distribution systems: Effect of assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon,” *Environmental Science & Technology*, 35(17), pp.3442-3447, DOI: 10.1021/es0106669.
- Glibert, P. M., C. A. Heil, D. Hollander, M. Revilla, A. Hoare, and J. Alexander et al., 2004, “Evidence for dissolved organic nitrogen and phosphorus uptake during a cyanobacterial bloom in Florida Bay,” *Marine Ecology Progress Series*, 280, pp.73-83, DOI: 10.3354/meps280073.
- Lee, S. M., K. D. Park, and I. K. Kim, 2020, “Comparison of machine learning

- algorithms for Chl-*a* prediction in the middle of Nakdong River (focusing on water quality and quantity factors),” *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 34(4), pp.277-288, DOI: 10.11001/jksww.2020.34.4.277.
- Paerl, H. W., W. S. Gardner, M. J. McCarthy, B. L. Peierls, and S. W. Wilhelm, 2014, “Algal blooms: Noteworthy nitrogen,” *Science*, 346(6206), p.175, DOI: 10.1126/science.1255679.
- Perez-Garcia, O., F. M. Escalante, L. E. De-Bashan, and Y. Bashan, 2011, “Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products,” *Water Research*, 45(1), pp.11-36, DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.037.
- Romo, S., J. Soria, F. Fernandez, Y. Ouahid, and Á. N. G. E. L. BARÓN-SOLÁ, 2013, “Water residence time and the dynamics of toxic cyanobacteria,” *Freshwater Biology*, 58(3), pp.513-522, DOI: 10.1111/j.1365-2427.2012.02734.x.
- Seo, D., J. Kim, and J. Kim, 2020, “Analysis of influence on water quality and harmful algal blooms due to weir gate control in the Nakdong River, Geum River, and Yeongsan River,” *Journal of Korea Water Resources Association*, 53(10), pp.877-887, DOI: 10.3741/JKWRA.2020.53.10.877.
- 국가통계포털, 2008-2015, “하천수의 수질현황 낙동강권역,” http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_01_0100061, [2020.10.21]
- 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>, [2021.3.23]
- 물환경정보시스템, 2008-2015, “물환경데이터,” <http://water.nier.go.kr/main/mainContent.do>, [2020.10.25]
- _____, 2008-2015, “보 모니터링,” http://water.nier.go.kr/bo/downTabList.do?menuIdx=7_1, [2020.10.21]
- 환경부 낙동강유역환경청, 2021, “수계관리위원회,” <http://me.go.kr/ndg/web/index.do?menuId=3600>, [2021.1.21]
- MyWater, 2008-2015, “수질오염사고 통계 - 물재해 현황,” <https://www.water.or.kr/disaster/safety>, [2020.10.23]

김용기: 포항공과대학교에서 산업경영공학, KDI국제 정책대학원에서 경영학과 공공정책학을 전공하였다. 현재는 서울대학교 환경대학원에서 환경계획학과 박사과정을 수료하였으며, 이전에는 연세대학교 사회과학연구소, 한국조세재정연구원, UNPD GEF YSLME (Yellow Sea LArge Marine Eco-system)에서 근무하였다. 관심 연구 분야는 Green Finance, 녹색 채권 평가, ESG 성과평가 등이다(rocker9018@gmail.com).

투 고 일: 2021년 02월 17일
심 사 일: 2021년 03월 07일
게재확정일: 2021년 04월 06일