

Research Paper

영주댐 운영 특성별 내성천 및 낙동강 수질 영향 및 기여도 분석 연구

김지원 · 서동일
충남대학교 환경공학과

A Study on the Impact and Contribution of Youngju Dam Operating Plans on the Water Quality of NaeseongCheon and the Nakdong River

Ji-Won Kim · Dongil Seo

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

요약: 국내 다목적댐은 하절기 강우기에 저수량을 확보하여 갈수시에 생공용수 및 하류 하천에 하천유지유량 및 환경개선유량을 공급하는 형태로 운영되고 있으며, 이러한 댐 운영방식은 댐 하류 하천의 수질에 영향을 미치고 있다. 본 연구의 목표는 영주댐의 월별 계획방류량이 하류 지천인 내성천과 낙동강 본류 구간에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 이를 위해, CE-QUAL-W2 모형을 이용한 수리-수질모델링을 통해 도달시간 및 수질 항목 변화를 모의하고, 댐 방류수의 도달시간을 고려한 TLCC(Time Lagged Cross Correlation) 방법으로 영주댐과 하류 내성천 및 낙동강 대표지점의 수질 상관관계를 분석하였다. 영주댐 방류와 내성천 5지점은 각 수질항목별 상관계수가 0.382~0.777로 유의미한 수질 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 영주댐-낙동강 본류간 수질의 상관계수는 수질항목별 -0.528 ~0.317 범위로 매우 약한 상관관계 또는 음의 상관관계가 나타내면서 영주댐과 낙동강 본류 수질에는 의미있는 상관관계가 성립하지 않는 것으로 나타났다. 이는 당초 영주댐 건설목표인 낙동강 본류 수질개선에는 실질적 실효성이 크지 않으며, 댐의 영향을 직접적으로 받는 내성천의 수질개선을 목표로 댐 운영계획의 검토 및 향후 연구가 이뤄져야 함을 보여주고 있다.

주요어: 영주댐, 내성천, 낙동강, 수질모델링, CE-QUAL-W2, TLCC기법, 상관계수

Abstract: Domestic multipurpose dams are operated to secure reservoir capacity during the summer rainy season, supplying domestic water and maintaining environmental flow in downstream rivers during low-flow periods. This operational approach affects the water quality of downstream rivers. The aim of this study is to evaluate the impact of monthly planned discharge from Youngju Dam on the downstream tributaries, NaeseongCheon and the main stream of the Nakdong River. To achieve this, hydrodynamic and water quality modeling was conducted using the CE-QUAL-W2 model to simulate travel times and changes in water quality parameters. The Time Lagged Cross

Correlation (TLCC) method was adapted to analyze the correlation between water quality at Youngju Dam and representative points in the downstream NaeseongCheon and Nakdong River, taking into account the travel time of the dam discharge.

The analysis revealed a significant water quality correlation between the discharge from Youngju Dam and the NaeseongCheon monitoring point (Point 5), with correlation coefficients ranging from 0.382 to 0.777. However, the correlation coefficients for water quality between Youngju Dam and the main stream of the Nakdong River ranged from -0.528 to 0.317, indicating either a very weak or negative correlation. This suggests that there is no significant correlation between the water quality of Youngju Dam and the Nakdong River main stream.

The findings indicate that the main objective of constructing Youngju Dam to improve the water quality of the Nakdong River main stream may not have substantial practical effectiveness. Therefore, it is essential to review the dam's operational plans with a focus on improving the water quality of NaeseongCheon, which is directly affected by the dam, and to conduct further research in this area.

Keywords: Youngju Dam, NaeseongCheon, Nakdong River, hydrodynamic and water quality modeling, Correlation analysis, TLCC

I. 서론

우리나라는 기후 및 지형특성상 하절기에 집중강우가 발생하고 가파른 지형에 따른 어려운 물관리 여건을 극복하기 위해 대부분의 대하천 상류에 다목적댐이 설치되어 운영되고 있다. 따라서 댐 하류 하천의 수질은 댐 방류량의 변화에 의해 크게 영향을 받게 된다(Ling TY et al. 2017, Chung et al. 2008). 낙동강에 설치된 영주댐은 총저수용량의 91.7%를 갈수기 하천유지용수로 공급하여 낙동강 수질을 개선하기 위해 설치되었으며, 기본계획에서 검토된 댐운영계획에 따라, 양호한 수질상태의 갈수기 대부분의 물량을 환경개선용수로써 내성천 및 낙동강으로 공급하고 있는 상황이다(MTMA&K-water 2009).

정부에서는 영주댐 환경영향평가 당시 방류로 인한 수질개선효과에 대한 수질모의를 위하여 하천 수질모형인 QUALKO(K-NIER)를 이용하여 영주댐 건설에 따른 낙동강 수계의 수질개선효과를 분석하였다(MTMA&K-water 2009). 댐 건설 후 수질개선효과를 예측한 결과, 갈수기 영주댐의 방류량을 증가시키에 따라 낙동강 하류 남지점의 BOD는 평균 0.06~0.27 mg/L, 최대 0.50mg/L까지 개선되는 것으로 예측되어 제시된 바 있다(MTMA and K-water 2009).

한편, 기존 연구에서 낙동강 보 건설 이후 낙동강 보

류의 수질 및 조류 발생 패턴은 이전과 다른 양상을 보이고 있음을 수질 모델링을 통해 제시한 바 있으나(Seo et al. 2012, Bae and Seo 2018; Bae and Seo 2021), 당초 영주댐의 건설목적인 환경유지용수 방류에 따른 낙동강 수질영향을 수질모의한 결과는 미비한 실정이다. 이에 따라 4가지 Case의 영주댐 월별 방류 시나리오에 따른 댐 하류 내성천 및 낙동강 본류 주요 다기능보 지점의 수질 영향을 검토함으로써, 영주댐 기본계획 수립 이후 4대강 사업 등 변화된 낙동강 본류의 수질환경을 고려하여 영주댐의 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 동적 수질모델인 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여, 다양한 댐 방류 시나리오에 따른 하류 내성천 및 낙동강 본류에 대한 영향을 정량적으로 평가함으로써, 댐 하류의 수질을 고려한 댐 운영방향을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역

본 연구의 연구대상지역은 영주댐과 댐에서 방류된 물은 하류 내성천 구간(내성천 5지점)을 거쳐 낙동강 본류인 상주보 상류로 유입되며, 4대강 사업으로 설치된 8개 보의 최하류 보인 창녕함안보까지를 연구대상 지역으로 하였다(Figure 1).

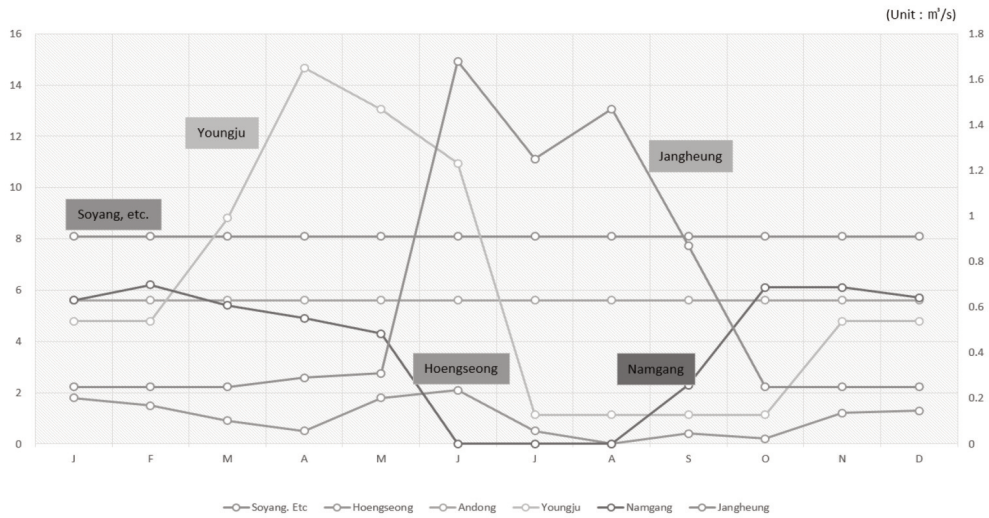


Figure 2. Key Patterns of Multipurpose Dams

Table 3. Monthly Discharge Amounts by Scenarios* (Unit : m³/s)

Classification		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
SCE 1	Basic Plan discharge	4.8	4.8	8.8	14.8	13.3	11.3	1.7	1.7	1.5	1.1	4.8	4.8
SCE 2	Uniform discharge	6.0	6.0	6.0	6.1	6.2	6.4	6.6	6.6	6.4	6.0	6.0	6.0
SCE 3	High flow Period discharge (Jangheung Dam Ratio)	2.54	2.54	2.54	3.07	3.37	17.50	13.26	15.52	9.21	2.55	2.55	2.54
SCE 4	Low flow Period discharge (Namgang Dam Ratio)	9.1	10.0	8.7	8.0	7.1	1.5	1.7	1.7	4.1	9.9	9.9	9.2

* Applying the restricted water level (=EL.148.1) from 21st June to 31st July

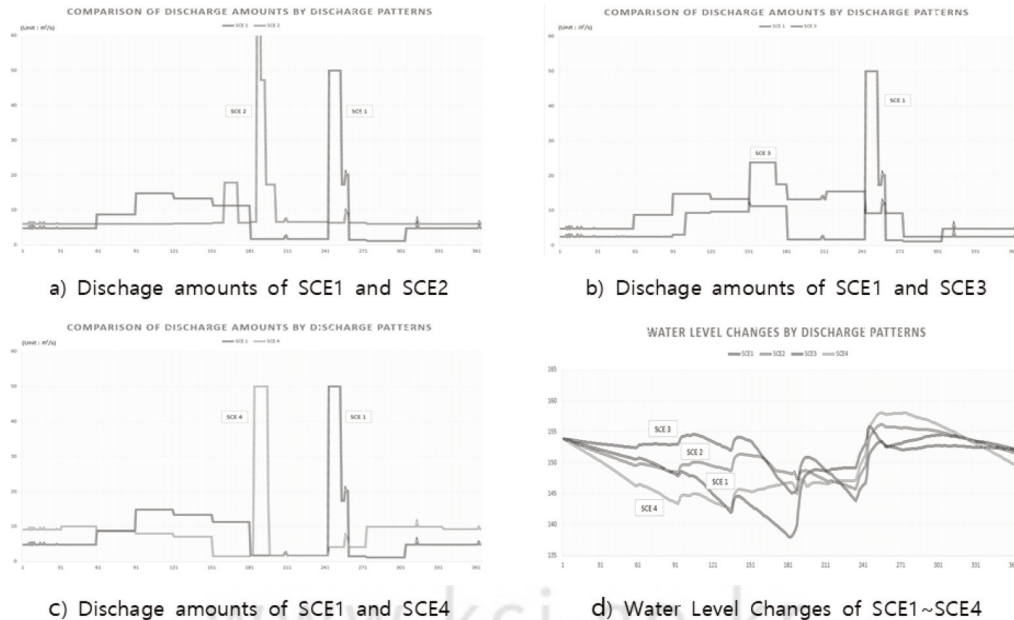


Figure 3. Comparison of Discharge Amounts & Water level by Discharge Patterns

Table 4. Model elements of CE-QUAL-W2 model for Youngju Dam, NaeseongCheon and Nakdong River

Study area	Water body	Branch	Segment	Simulated water quality constituents
Youngju Dam	2	3	119	38 constituents (TOC, TN, TP, etc.)
NaeseongCheon	1	1	205	
Nakdong River	9	9	581	

3. 수질 모형의 적용

1) 모형의 선정

국내에서는 하천과 저수지, 하구의 영양염류 및 조류 발생 모의를 위해 EFDC, WASP, CE-QUAL-W2 등 다양한 모형이 적용되어 왔다(Bae and Seo 2021, Kim et al. 2021a, 2021b, Kim et al. 2022, Kim and Seo 2024). 본 연구에서는 영주댐 하류 하천 구간의 수질변화를 모의하기 위하여 2차원 수치모형인 CE-QUAL-W2모형(Cole and Wells 2006)을 활용하였다. CE-QUAL-W2 모형은 장기간의 모의에 적합하도록 큰 계산시간에서 안정하며, 상, 하류의 경계조건을 규정하여 지류(branch)를 적절히 조합함으로써 특히 하천, 호수 등의 다른 수체 등을 동시에 모의 및 시간에 따라 변화하는 경계조건의 입력이 가능하다.

2) 모형 지형자료 구축

본 연구에서는 K-water에서 구축되어 있는 영주댐, 내성천 및 낙동강 본류 구간의 CE-QUAL-W2 지형자

료를 이용하였다(Lee et al. 2020). 모형의 지형자료 구축 결과는 Table 4 및 Figure 4~Figure 6과 같다.

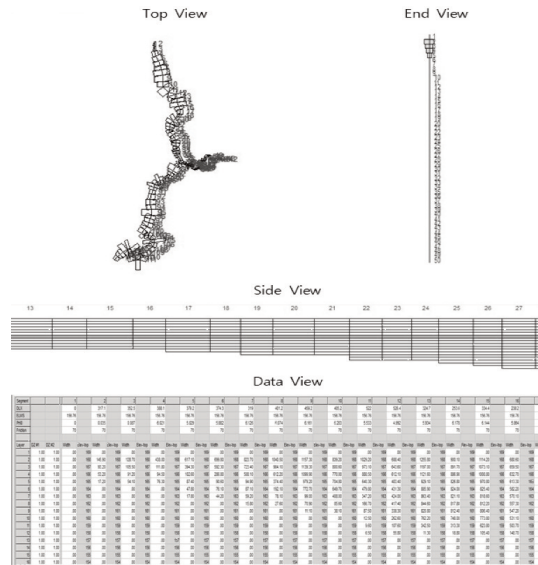


Figure 4. Model grids of CE-QUAL-W2 model for Youngju Dam

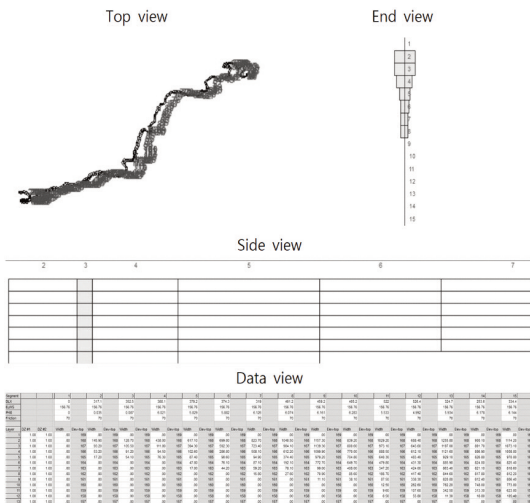


Figure 5. Model grids of CE-QUAL-W2 model for Naeseong Cheon

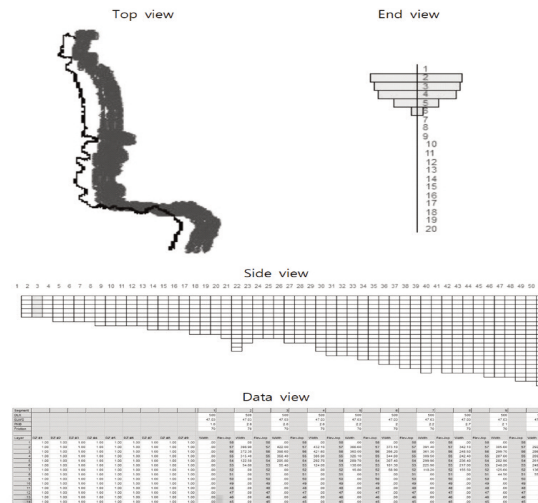


Figure 6. Model grids of CE-QUAL-W2 model for Nakdong River

Table 5. Monthly average rainfall of the YoungJu Dam watershed during 2021-2023 (Unit : mm)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2021	6	10	112	98	153	62	196	233	153	50	37	0	1,110
2022	0	0	87	41	3	69	145	284	33	45	38	4	749
2023	24	9	26	57	110	283	372	311	192	10	28	90	1,512

3) 모의 대상 연도의 선정

모의 대상 연도 선정을 위해 2021~2023년 3년간 영주댐 유역 월별 강우량 현황을 분석하였다. 영주댐이 담수를 시작하고 본격적으로 운영되기 시작한 것은 '19년 하반기 이후이며, 최근 3년의 강우량 현황은 Table 5와 같다. 영주댐으로 인한 하류 하천영향 분석을 위하여 최근 3년의 연간 강우량을 비교하였으며, 과소 또는 과다한 강우시 하류영향에 대한 정도가 매우 격차가 클 것을 고려하여 분석대상연도를 2021년도로 선정하였다.

4) 모형의 보정

본 연구의 모델링 수행에 앞서 각 수체에 대한 수질 항목별 보정을 시행하였다. 모형의 보정은 2021년 실제 댐 수질과 내성천, 낙동강 수질을 기준으로 보정하였다. 영주댐 1지점, 내성천 5지점, 낙동강 3개지점(상

주보, 달성보, 함안보)에 대하여 실측자료와 모의결과를 바탕으로 수행하였으며, 모델 보정결과에 대한 평가지표는 모의결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 MAE (Mean Absolute Error, 절대평균오차)와 RMSE (Root Mean Squared Error, 평균제곱근오차)를 사용하였다. 수질자료의 특성상 시기별 이상치가 있으나 전반적으로 수질 변화추세를 잘 보여주고 있다. 주요 수질항목에 대한 모델 보정수행결과 및 평가지표는 Figure 7과 Table 6에 각각 제시하였다.

4. TLCC (Time Lagged Cross Correlation) 기법을 통한 영주댐 수질의 하류 기여도 평가

1) Time-Lagged Cross Correlation (TLCC) 기법의 개요

본 기법은 두 시계열 데이터 간의 상관관계를 시간 차이를 두고 분석하는 방법이다. 이 기법은 하나의 시

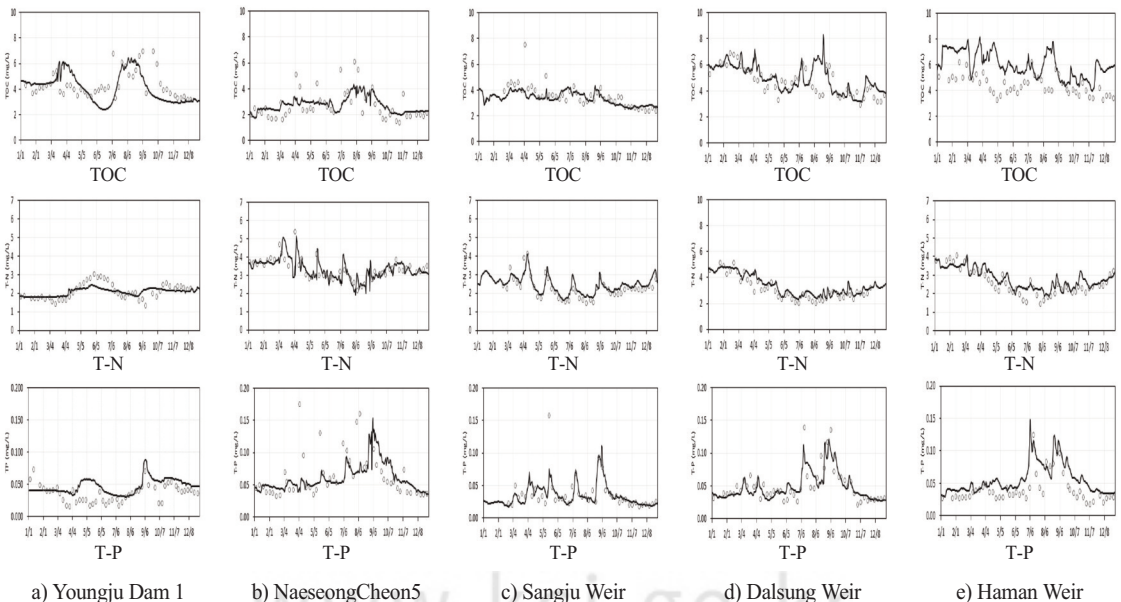


Figure 7. Results of Model Calibration by Major Water Quality Parameters

Table 6. Model Calibration Evaluation Indicators by Water Quality Parameter for Each Water Body

Site	Indicators	Temp. (°C)	DO (mg/L)	TOC (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Youngju Dam 1	MAE	1.1	2.2	0.9	0.245	0.019
	RMSE	1.5	3.0	1.4	0.314	0.023
NaeseongCheon 5	MAE	2.3	0.5	0.7	0.320	0.020
	RMSE	2.8	0.7	1.0	0.483	0.033
Sangju Weir	MAE	1.3	0.8	0.4	0.230	0.011
	RMSE	1.6	1.0	0.7	0.296	0.028
Dalsung Weir	MAE	1.1	1.1	0.7	0.318	0.010
	RMSE	1.2	1.5	1.0	0.395	0.015
Haman Weir	MAE	1.0	1.3	1.5	0.304	0.017
	RMSE	1.2	1.6	1.8	0.370	0.021

계열이 다른 시계열보다 시간적으로 앞서거나 뒤쳐져 있을 때, 두 시계열 간의 상관관계를 평가하는 데 사용된다. TLCC는 특히, 한 변수의 변화가 일정한 시간 지연을 두고 다른 변수의 변화에 영향을 미치는 상황에서 유용하다. 이 값은 두 시계열 데이터가 얼마나 유사하게 움직이는지 평가한다.

각 시나리오별 도달시간을 고려하여 항목별 지연된 수질자료를 기반으로 Data Set을 구성하여 상관계수를 산정하였다. 상관계수의 산정공식은 아래 수식과 같다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

여기서, r 은 상관계수(correlation coefficient), x_i 는 x 변수의 i 번째 값, \bar{x} 는 x 변수의 평균, y_i 는 y 변수의 i 번째 값, \bar{y} 는 y 변수의 평균, n 은 비교 자료의 개수이다.

2) 분석 방법

영주댐 운영계획의 변경에 따른 영주댐의 수질변화와 낙동강 주요지점의 수질변화와의 상관성은 영주댐의 방류시점과 비교대상지점의 수질변화에 대해서 시계열적인 차이를 고려하여 TLCC(Time Lagged Cross Correlation)기법을 활용하여 상관도를 비교 분석하였다.

시계열적인 차이는 CE-QUAI-W2의 Tracer기능을 활용하여 각 Case별 도달시간을 산정하여 각 비교 Data

Set을 구성하였다. Tracer기능은 비반응성 물질을 가정하여 입력하여 모델링을 수행하여 해당 물질이 검출되는 시점을 도달시간(Travel Time)으로 판단하는 방법이다.

각 시나리오별로 수행된 모의결과를 기반으로 영주댐 방류수질과 하류 하천의 주요 지점간의 도달시간을 고려하여 상관도 분석을 통해 기여도를 평가하였다. 상관관계 분석 대상지점은 내성천의 영향을 고려하기 위한 내성천 말단부(내성천5지점), 낙동강 합류이후 상주보 지점, 금호강 합류 이후 달성보 지점, 기본계획 시 수질개선 목표지점인 창녕함안보지점을 분석 대상으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 댐 방류 시나리오별 영주댐 방류수의 수질변화 모의 결과

영주댐 운영계획의 변경에 따른 영주댐 방류수의 수질 모의결과는 Table 7, Figure 8에 제시하였다. 장흥댐의 방류패턴을 적용한 SCE 3의 경우, 기본계획 방류패턴인 SCE 1과 비교하여 Chl-a의 연평균 7.7mg/m³, TOC의 경우 0.2mg/L가 개선되는 것으로 모의되었다.

2. 댐 방류 시나리오별 내성천 등 하류하천 수질변화 모의 결과

영주댐의 방류 시나리오별 하류 하천의 수질모의 결과(내성천5, 상주보, 달성보, 창녕함안보 지점)를 Table

Table 7. Simulation Results of Monthly Water Quality of Youngju Dam discharged Water by Scenarios

a) T-P (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	0.040	0.039	0.037	0.063	0.053	0.031	0.036	0.054	0.086	0.073	0.062	0.058	0.053
SCE 2	0.040	0.039	0.037	0.046	0.064	0.041	0.089	0.075	0.091	0.078	0.069	0.055	0.060
SCE 3	0.040	0.040	0.037	0.046	0.055	0.038	0.060	0.078	0.101	0.071	0.064	0.053	0.057
SCE 4	0.039	0.036	0.037	0.065	0.065	0.039	0.076	0.072	0.091	0.082	0.067	0.058	0.061

b) Chl-a (mg/m ³)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	12.3	41.1	33.6	21.9	2.7	4.3	57.6	78.6	22.6	15.2	9.4	9.4	25.7
SCE 2	22.0	49.5	37.7	20.8	3.8	5.3	7.2	68.9	52.4	25.4	10.6	7.4	25.8
SCE 3	2.5	5.7	36.9	23.5	4.0	2.7	20.7	75.5	26.0	8.4	3.8	4.2	18.0
SCE 4	25.7	36.2	41.2	23.1	2.9	3.6	29.6	87.6	39.7	26.6	13.5	12.6	28.6

c) TOC (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	4.7	5.5	5.7	4.9	3.3	2.3	4.7	6.7	4.5	3.7	3.1	3.0	4.3
SCE 2	4.9	5.8	5.7	5.1	3.6	2.6	3.5	5.7	5.5	4.0	3.3	3.2	4.4
SCE 3	4.5	4.4	5.3	5.2	3.7	2.6	4.0	5.8	4.5	3.3	3.0	3.0	4.1
SCE 4	4.9	5.4	5.8	4.8	3.2	2.5	4.2	6.8	5.2	4.2	3.4	3.2	4.5

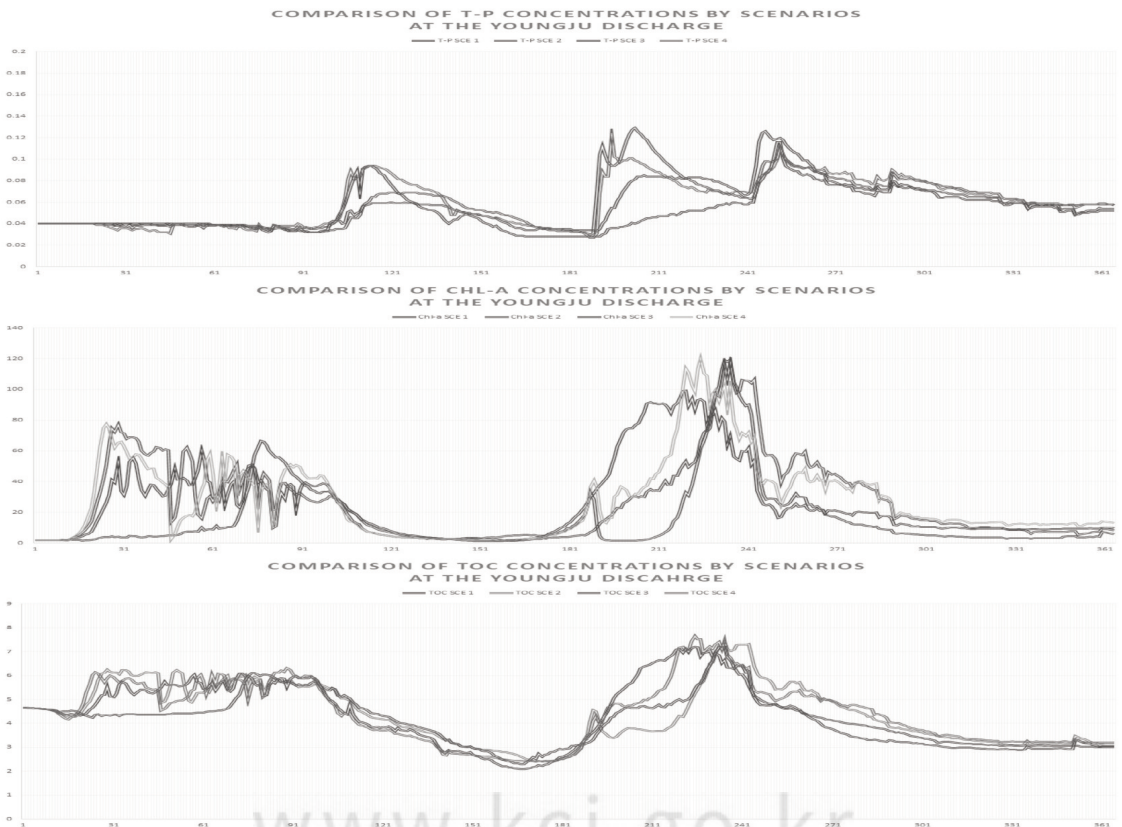


Figure 8. Simulation results for T-P, Chl-a, and TOC at Youngju Dam discharge point.

Table 8. Simulation Results of Monthly Water Quality of NaeseongCheon 5point by Scenarios

a) T-P (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	0.046	0.041	0.041	0.052	0.061	0.050	0.077	0.080	0.110	0.074	0.053	0.042	0.061
SCE 2	0.046	0.037	0.043	0.049	0.060	0.055	0.080	0.088	0.120	0.074	0.059	0.044	0.063
SCE 3	0.045	0.047	0.049	0.050	0.058	0.051	0.078	0.087	0.122	0.072	0.054	0.038	0.062
SCE 4	0.046	0.040	0.041	0.053	0.065	0.057	0.080	0.085	0.121	0.077	0.060	0.047	0.065
b) Chl-a (mg/m ³)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	1.5	11.7	14.2	4.7	1.4	1.8	7.8	22.7	4.8	1.5	3.0	3.6	6.6
SCE 2	1.9	15.4	11.9	2.9	1.3	2.8	3.2	9.3	6.1	6.1	4.3	3.4	5.7
SCE 3	1.5	2.6	5.5	3.2	1.5	2.0	4.9	17.3	4.2	2.1	2.3	2.1	4.1
SCE 4	3.2	12.9	13.4	4.0	1.4	1.7	5.0	13.8	3.7	7.3	5.9	5.5	6.4
c) TOC (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	2.3	3.1	3.9	3.5	2.9	2.4	2.9	3.7	3.3	2.3	2.2	2.2	2.9
SCE 2	2.4	3.5	3.6	3.1	2.7	2.6	2.9	3.1	3.2	2.7	2.4	2.4	2.9
SCE 3	2.1	2.4	2.9	3.1	2.9	2.6	3.1	3.7	3.2	2.4	2.1	2.0	2.7
SCE 4	2.7	3.6	3.9	3.2	2.7	2.4	2.9	3.2	3.1	2.9	2.6	2.5	3.0

Table 9. Simulation Results of Monthly Water Quality of Sangju Weir by Scenarios

a) T-P (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	0.025	0.022	0.028	0.048	0.050	0.028	0.039	0.041	0.055	0.030	0.023	0.021	0.034
SCE 2	0.025	0.022	0.028	0.047	0.048	0.029	0.042	0.044	0.055	0.033	0.025	0.021	0.035
SCE 3	0.023	0.022	0.028	0.048	0.048	0.030	0.042	0.046	0.056	0.031	0.023	0.019	0.035
SCE 4	0.026	0.023	0.029	0.048	0.049	0.027	0.041	0.041	0.054	0.035	0.028	0.024	0.035
b) Chl-a (mg/m ³)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	24.6	25.7	27.6	13.7	3.9	3.3	4.3	7.6	3.7	3.0	5.1	8.8	10.9
SCE 2	24.8	23.3	27.9	12.6	3.9	3.5	3.9	5.2	3.6	4.2	5.6	8.5	10.5
SCE 3	23.1	25.2	28.1	12.6	3.9	3.3	4.2	8.4	3.2	3.2	5.0	8.4	10.7
SCE 4	24.8	28.9	29.7	13.7	4.0	3.3	4.2	5.7	2.9	4.5	5.6	8.9	11.3
c) TOC (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	3.6	3.5	4.1	3.7	3.3	3.6	3.8	3.5	3.3	2.8	2.7	2.8	3.4
SCE 2	3.6	3.5	4.1	3.6	3.3	3.6	3.8	3.4	3.2	2.8	2.7	2.8	3.4
SCE 3	3.5	3.4	4.0	3.6	3.4	3.6	3.8	3.5	3.2	2.8	2.7	2.7	3.4
SCE 4	3.6	3.7	4.2	3.7	3.3	3.7	3.8	3.4	3.2	2.9	2.7	2.8	3.4

8~Table 11에 각각 나타내었으며, 각 지점에 대한 T-P, Chl-a, TOC의 시계열적 모의 결과를 Figure 9에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이, 영주댐 방류수의 수질변화에 따라 내성천의 경우 시나리오별 T-P 0.1~0.4mg/L,

Chl-a 0.2~2.5mg/m³, TOC 0~0.2mg/L의 변화폭이 있는데 반해, 낙동강 수계의 경우 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 10. Simulation Results of Monthly Water Quality of Dalsung Weir by Scenarios

a) T-P (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	0.034	0.037	0.043	0.040	0.039	0.045	0.076	0.070	0.087	0.048	0.035	0.028	0.048
SCE 2	0.034	0.037	0.043	0.041	0.037	0.045	0.075	0.070	0.086	0.048	0.035	0.029	0.048
SCE 3	0.034	0.037	0.044	0.041	0.037	0.045	0.075	0.070	0.086	0.049	0.035	0.028	0.049
SCE 4	0.034	0.037	0.042	0.041	0.038	0.046	0.074	0.070	0.087	0.048	0.036	0.030	0.049
b) Chl-a (mg/m ³)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	23.2	17.3	31.2	42.3	24.3	14.1	13.5	54.0	8.6	6.9	34.2	30.7	25.1
SCE 2	23.3	17.4	31.5	43.7	23.3	14.4	14.8	51.6	8.6	7.1	36.1	32.4	25.4
SCE 3	23.1	17.2	31.9	43.9	23.6	13.8	13.4	52.9	8.7	6.8	34.9	31.1	25.2
SCE 4	23.5	17.4	31.3	44.1	23.7	14.8	15.4	54.3	8.2	6.8	37.5	34.4	26.0
c) TOC (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	5.9	6.1	5.6	5.5	4.8	4.2	4.9	6.2	4.1	3.7	4.0	4.1	4.9
SCE 2	5.9	6.1	5.6	5.6	4.8	4.2	4.9	6.1	4.1	3.6	4.1	4.2	4.9
SCE 3	5.9	6.2	5.8	5.5	4.7	4.1	4.9	6.1	4.1	3.7	4.0	4.2	4.9
SCE 4	5.9	6.0	5.5	5.6	4.8	4.2	4.9	6.2	4.1	3.6	4.1	4.3	4.9

Table 11. Simulation Results of Monthly Water Quality of Haman Weir by Scenarios

a) T-P (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	0.028	0.027	0.032	0.037	0.032	0.043	0.087	0.073	0.085	0.050	0.035	0.026	0.046
SCE 2	0.028	0.027	0.032	0.037	0.032	0.042	0.086	0.073	0.086	0.049	0.035	0.026	0.046
SCE 3	0.028	0.027	0.031	0.037	0.032	0.042	0.087	0.072	0.086	0.050	0.035	0.026	0.046
SCE 4	0.029	0.027	0.032	0.037	0.032	0.043	0.086	0.072	0.086	0.049	0.035	0.027	0.046
b) Chl-a (mg/m ³)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	23.2	14.6	22.0	38.2	21.0	17.6	16.9	54.7	17.3	15.5	30.6	33.5	25.5
SCE 2	23.3	14.6	21.8	38.1	21.3	17.7	18.4	55.0	17.6	15.3	31.2	33.7	25.8
SCE 3	23.4	14.5	21.6	38.4	21.4	17.2	16.5	53.9	17.8	15.1	31.0	33.8	25.5
SCE 4	23.2	14.7	21.8	38.1	21.4	18.2	18.4	57.3	17.3	14.9	31.3	33.8	26.0
c) TOC (mg/L)													
Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
SCE 1	5.1	4.8	4.8	5.0	4.5	4.5	5.2	6.4	4.5	4.2	3.9	4.4	4.8
SCE 2	5.1	4.8	4.7	5.1	4.6	4.5	5.2	6.3	4.5	4.2	3.9	4.4	4.8
SCE 3	5.1	4.8	4.7	5.1	4.5	4.4	5.2	6.3	4.5	4.2	3.9	4.4	4.8
SCE 4	5.1	4.9	4.7	5.1	4.6	4.5	5.2	6.5	4.5	4.2	3.9	4.4	4.8

3. 댐 방류 시나리오별 수질모의 결과에 대한 상관성 분석결과

1) 영주댐 하류 하천지점별 도달시간 산정 결과
각 시나리오별 산정된 도달일수는 Table 12와 같다.

영주댐 방류 이후 각 수체의 주요 지점에 도달하여 실질적인 영향을 미치기 시작하는 시기는 각 시나리오별 내성천 말단의 경우 8~15일이 소요되며, 창녕함안보의 경우, 86~96일이 소요되었다.

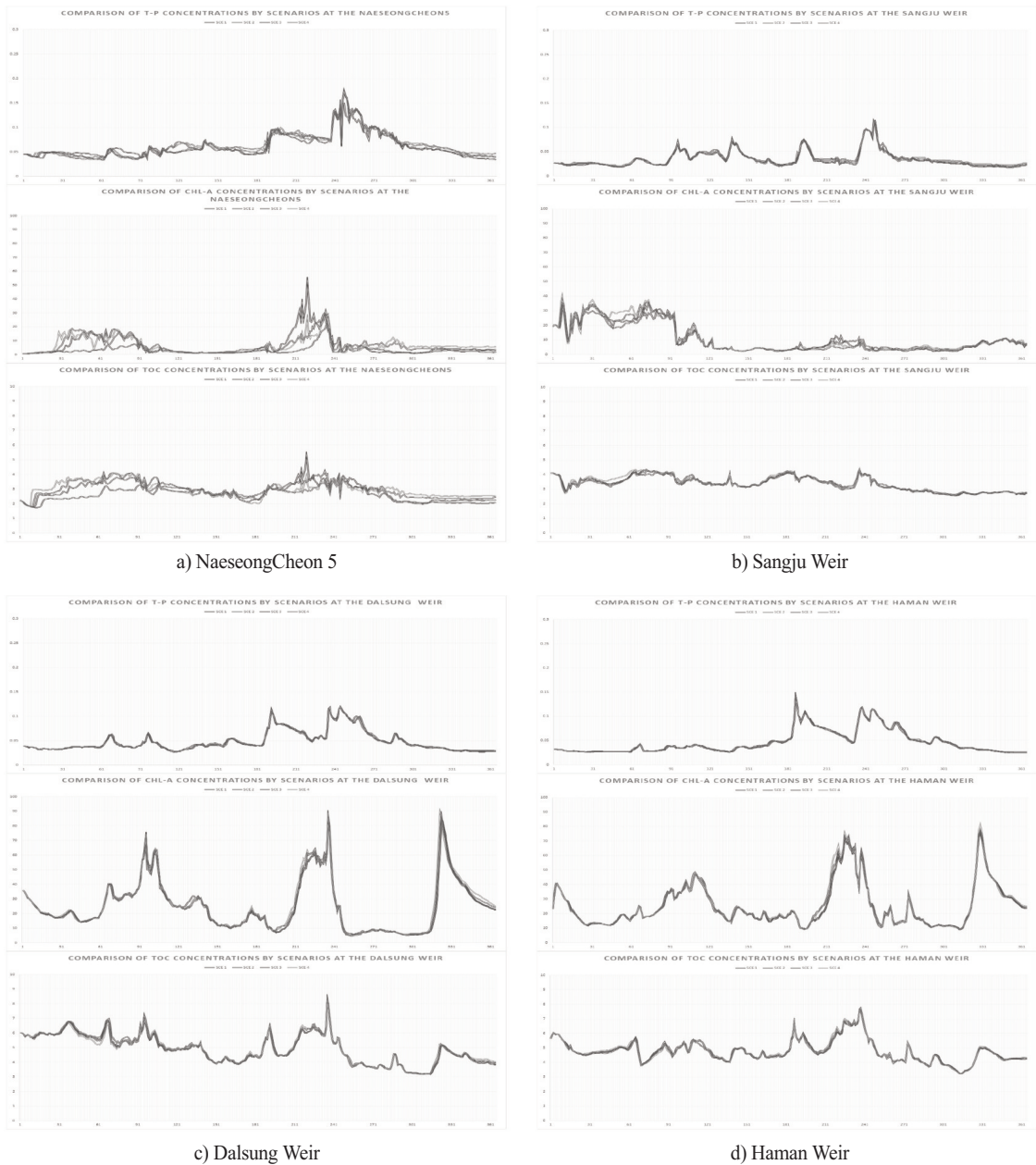


Figure 9. Simulation results for T-P, Chl-a, and TOC at the representative locations in NaeseongCheon 5 and Nakdong River (Sangju, Dalsung, and Haman weir)

Table 12. Travel time at the downstream locations along the dam discharge scenarios (unit : days)

Scenarios	YoungJu Dam	NaeseongCheon	Sangju weir	Dalsung weir	Haman weir
SCE 1	-	12	16	72	91
SCE 2	-	11	15	70	90
SCE 3	-	15	21	79	96
SCE 4	-	8	12	64	86

Table 13. TLCC analysis dataset for T-P under Scenario 1 (unit : days, mg/L)

YoungJu Dam		NaeseongCheon		Sangju weir		Dalsung weir		Haman weir	
Day	T-P	Day	T-P	Day	T-P	Day	T-P	Day	T-P
1	0.040	12	0.037	16	0.022	72	0.038	91	0.035
2	0.040	13	0.038	17	0.022	73	0.039	91	0.035
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		365	0.034	365	0.022	365	0.028	365	0.025
Number of Data		354		350		294		275	

Table 14. Correlation coefficient between the water quality constituents by dam operation scenarios

Classification		YoungJu Dam	NaeseongCheon 5	Sangju weir	Dalsung weir	Haman weir
SCE 1	T-P	-	0.382	0.048	-0.387	-0.174
	Chl-a	-	0.777	0.108	-0.441	-0.379
	TOC	-	0.777	0.317	-0.528	-0.429
SCE 2	T-P	-	0.600	0.041	-0.108	-0.226
	Chl-a	-	0.553	0.109	0.029	0.124
	TOC	-	0.758	0.217	-0.305	-0.212
SCE 3	T-P	-	0.586	0.133	-0.326	-0.365
	Chl-a	-	0.384	-0.211	-0.352	0.125
	TOC	-	0.604	0.199	-0.399	-0.092
SCE 4	T-P	-	0.625	0.144	-0.126	-0.079
	Chl-a	-	0.636	0.122	-0.225	-0.226
	TOC	-	0.739	0.247	-0.444	-0.519

2) 수질항목별 도달시간을 고려한 분석 결과

상기 시나리오별 모의결과를 기반으로 영주댐 방류 수질과 하류 하천 각 지점의 수질변화와의 TLCC(Time lagged Cross Correlation) 상관성 분석을 위하여 Table 12에서 산정된 도달시간을 고려하여 분석 자료를 구성하였다. 각 시나리오 중 SCE 1 (기본계획 방류)에 T-P에 대한 상관도 분석 Data Set 예시를 Table 13에 제시하였다. SCE 1의 경우, 각 지점마다 354개, 350개, 294개, 275개의 Data Set을 구성할 수 있다.

Table 13과 같이, 각 시나리오별 수질항목별로 구성된 Data Set을 통해 각 항목별 및 각 지점별 상관계수를 도출하였으며, 그 결과는 Table 14와 같다. 표에서 보는 바와 같이, 내성천달단 지점에서는 시나리오별 항목별 상관계수가 0.382~0.777로 나타났으며, 이는 대체로 영주댐 방류수질과 내성천 수질이 상당한 상관관계가 있는 것으로 판단되었다.

반면, 낙동강 합류이후 상주보 및 달성보, 창녕함안

보지점과의 시나리오별 수질항목별 상관계수는 매우 불규칙한 경향성을 나타냈다. 상주보의 경우, -0.211~0.317 수준으로 지점별로 음의 상관관계 또는 매우 약한 상관관계를 나타내었으며, 달성보의 경우 역시, -0.528~-0.029 수준으로 약한 음의 상관관계 또는 매우 약한 상관관계로 나타났다. 창녕함안보의 경우 -0.519~0.125 수준으로 역시 음의 상관관계 또는 매우 약한 상관관계로 나타났다.

4. 시나리오별 하류 하천 수질기여도 분석결과 고찰

본 연구를 통해 영주댐의 다양한 방류 시나리오별 방류수 수질의 변화에 따른 내성천 하류와 낙동강 주요 보 지점의 수질변화에 대한 상관성을 분석하였다. 내성천 하류부(내성천5지점)의 경우, 상관계수가 0.777 (SCE 1, Chl-a 및 TOC항목)을 나타내, 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었으며, 기타 시나리오의 경우 역시, 항목별로 0.382~0.758의 상당히 높은 상관관계를

Table 15. 8 large weirs in Nakdong River

Contents	Sangju weir	Nakdan weir	Gumi weir	Chilgok weir	Gangjeong weir	Dalsung weir	Hapcheon Weir	Haman weir	Total
Operational water level (EL.m)	47.0	40.0	32.5	25.5	19.5	14.0	10.5	5.0	-
Storage (million m ³)	27.4	34.7	52.7	75.3	92.3	58.6	70.0	100.9	511.9
Lower limit water level (EL.m)	43.6	37.4	22.6	24.5	14.9	6.6	2.3	1.5	-
Storage (million m ³)	12.4	21.0	2.6	62.0	35.1	6.6	5.9	42.6	188.2

보이는 것으로 분석되었다. 그러나 낙동강 수계의 모든 지점(상주보, 달성보, 창녕함안보)에서는 수질항목별로 음의 상관관계 또는 매우 약한 상관관계를 나타내었다. 이는 영주댐의 방류방식의 변화에도 불구하고 실질적인 낙동강 수질에 미치는 영향은 미미하며, 낙동강의 수질변화는 유역의 다양한 환경변화 및 다기능보 등에 의한 조절하천화에 따른 수리적 영향에 더욱 영향을 받는 것을 알 수 있다(Lee et al. 2014).

특히 4대강사업 이후 낙동강 본류에 8개 보의 건설에 따라 Table 15에서 보는 바와 같이, 낙동강 수계의 체적 및 체류시간이 증가하였다. 낙동강의 경우, 324백만 m³ 정도의 수체 용량이 증가함에 따라 약 2.7배의 체류시간이 증가하였으며, 이에 따른 오염원의 거동양상이 변화되었으며 이는 상류 댐의 방류량에 의한 변화를 갖게 할 수 있는 요인이라 할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 영주댐 기본계획방류량의 변경에 따른 하류하천 수질 기여도 분석을 CE-QUAL-W2 모형을 통한 수리-수질모델링과 TLCC 상관도 분석을 통해 수행하였다. 홍수기 제한수위를 고려한 기본계획 방류시(SCE1)와 비교하여, 연중 균등방류방식(SCE2)과 장흥댐 방류비율Case(SCE3), 남강댐 방류비율Case(SCE4)를 각각 시나리오1~4로 설정하여 모의하였고, 각 시나리오별 내성천 말단 지점과 낙동강 본류 주요 보 지점의 수질을 비교하여 영주댐 방류수 수질의 변

화에 따른 하류하천의 수질변화 기여도를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 각 시나리오별 방류량에 대하여, 하류하천의 영향에 대해서는 하류하천 각 지점별 도달시간(내성천 5지점 8~14일, 창녕함안보 86~96일)을 고려하여 TLCC (Time lagged Cross Correlation) 기법으로 분석한 결과, 내성천5지점은 상관계수가 0.382~0.777까지 나타나 항목별 차이를 보이기는 하나, 영주댐-내성천간의 수질 상관관계가 높은 것으로 분석되었다.

둘째, 영주댐 방류수와 낙동강 하천수질에 대한 수질상관성 분석결과, 상주보의 경우, Case별 -0.211~0.317으로 음의 상관관계 또는 대체로 0.1~0.3 내외의 매우 약한 상관관계를 나타내 영주댐-상주보간 수질상관성은 매우 낮은 것으로 분석되었다.

셋째, 영주댐 방류수와 달성보 지점에 대한 수질상관성 분석결과, 상관계수가 Case별 -0.528 ~0.029로 나타나 대체로 음의 상관관계 및 매우 약한 상관관계를 보였다. 이는 영주댐-달성보 간 거리에 따른 다양한 환경영향에 의한 것으로 판단되며, 영주댐에 의한 실질적인 기여율은 매우 낮은 것으로 분석되었다.

넷째, 영주댐 방류수와 창녕함안보 지점에 대한 수질상관성 분석 결과, 달성보와 마찬가지로 Case별 -0.519 ~0.125로 대체로 음의 상관관계와 매우 약한 양의 상관관계를 나타내어 수질기여율은 매우 낮은 것으로 분석되었다.

다섯째, 상기 결과들을 종합해 볼 때, 당초 영주댐의 건설목표인 갈수기 영주댐의 방류로 인한 낙동강하류

지점의 수질개선은 실질적인 실효성이 없으며, 영주댐 방류를 통한 직접 영향범위인 내성천의 수질개선을 위한 목표로 중권역 수질관리 차원의 중점적인 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

여섯째, 특히 각 시나리오별 영주댐 방류수질은 SCE 3의 풍수기 방류형태로 변경을 통해 홍수기 이후 유입된 비점오염원의 배출을 통해 연평균 Chl-a가 약 7.7mg/m³, TOC의 경우 0.2mg/L가 개선되는 것으로 모의됨에 따라 매년 반복되는 영주댐의 녹조문제 등이 상당히 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Kim JY, Seo DI. 2024. Three-dimensional augmentation for hyperspectral image data of water quality: An integrated approach using machine learning and numerical models. *Water Research* 251: 121125.
- Bae SI, Seo DI. 2021. Changes in algal bloom dynamics in a regulated large river in response to eutrophic status. *Ecological Modelling* 454: 109590.
- Bae SI, Seo DI. 2018. Analysis and modeling of algal blooms in the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling* 372: 53-63.
- Chung SW, Ko IH, Kim YK. 2008. Effect of reservoir flushing on downstream river water quality. *Journal of Environmental Management* 86(1): 139-147.
- Cole TM, Wells SA. 2006. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.5. USACE Washinton DC.
- Kim JY, Seo DI, Jang MY, Kim JY. 2021a. Augmentation of limited input data using an artificial neural network method to improve the accuracy of water quality modeling in a large lake. *Journal of Hydrology*, 602: 126817.
- Kim JY, Jones J, Seo DI. 2021b. Factors affecting harmful algal bloom occurrences in a Korean river with regulated hydrology. *J. of Hydrology Regional Studies* 33.
- Kim JY, Seo DI, Jones J. 2022. Harmful algal bloom dynamics in a tidal river influenced by hydraulic control structures. *Ecological Modelling* 467: 109931.
- Lee SW, Jeong SA. 2020. Development of Integrated Water Environment Technology for Dam Watershed. K-water.
- Lee JW, Bae SI, Lee DR, Seo DI. 2014. Transportation Modeling of Conservative Pollutant in a River with Weirs-The Nakdong River Case. *J. of Korean Society of Environmental Engineers* 36(12): 821-827.
- Ling T, Gerunsin N, Soo C, Nyanti L, Sim S, Grinang J. 2017. Seasonal changes and spatial variation in water quality of a large young tropical reservoir and its downstream river. *Journal of Chemistry* 2017(1): 8153246.
- Seo DI, Kim MA, Ahn JH. 2012. Prediction of Chlorophyll-a Changes due to Weir Constructions in the Nakdong River Using EFDC-WASP Modelling. *Environmental Engineering Research* 17(2): 95-102.
- K-water. 2023. Practical Guide for Multipurpose Dam Management.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea & Korea Water Resources Corporation. 2009. Basic plan report for the Songriwon multipurpose dam construction project.