남강댐 하류유역 수질개선 필요유량 산정에 관한 연구

김경훈 · 정강영 · 이인정 · 이경락 · 천세익 · 임태호 · 윤종수[†]

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

A Study on Instream Flow for Water Quality Improvement in Lower Watershed of Nam River Dam

Gyeong-Hoon Kim · Kang-Young Jung · In-Jung Lee · Kyung-Lak Lee · Se-Uk Cheon · Tae-Hyo Im · Jong-Su Yoon[†]

Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 17 October 2013, Revised 18 December 2013, Accepted 14 January 2014)

Abstract

Despite the implementation of TMDL, the water quality in lower watershed of Nam river dam has worsened continuously since 2005. Multifarious pollution sources such as cities and industrial districts are scattered around it. Nam river downstream bed slope is very gentle towards the downstream water flow of slows it down even more, depending on the water quality deterioration is accelerated eutrophication occurs. In this study, the mainstream in lower watershed of Nam river dam region to target aquatic organic matter by phytoplankton growth contribution was evaluated by statistical analysis, and statistical evaluation of water quality and the accuracy of forecasting, model calibration and verification procedures by completing QUALKO2 it's eutrophic phenomena that occur frequently in the dam outflow through scenarios predict an increase in water quality management plans to present the best should.

Key words : Dam outflow, Nam river watershed, Multivariate analysis, Pearson correlation coefficient, QUAL2E, QUALKO2

1. Introduction

지금까지 환경부는 수질오염총량관리제 기간 동안 환경기초시설확대, 오염원 관리 등 지속적인 유역중심의 예방적 수질관리 정책을 통해 BOD항목에 대한 수질개선을 위해 노력해 왔으며, 그 결과 지역별로 수질이 개선되거나 안정적으로 관리가 이뤄져 왔다. 하지만 인위적 수량통제로 인해 강 합류부나 하구연 등의 관리지점에서는 정체수역이 형성되어 하천 내·외부에서 유입되는 오염물질들에 의한 부영양화로 수량이 적은 저·갈수기에는 여전히 수질이 악화될 가능성이 높다. 일반적으로 하천의 유기물은 외부오염으로부터 기인되는 외부 기원 유기물과 내부의 영양염을 이용하여 성장하는 조류에 의해 기인되는 내부 생성 자생 유기물로 나타난다(Kim and Lee, 2001a, 2001b).

낙동강에 합류되는 남강 역시 하류유역은 하상구배가 매우 완만하고, 주변의 도시와 농경지로부터 물 사용량이 많아 저·갈수기에는 유속이 더욱 느려져 이로 인해 수질악화가 가속화되어 수역의 영양단계가 점점 증가하는 부영양화 현상이 자주 발생되고 있다(Kim, 2005). Jeong (2010)의 연구결과에 따르면 2006년~2008년까지 남강하류 유역에 Carlson에 의한 TSI(Trophic State Index)로 부영양화 정도

를 조사한 결과, 연중 TSI 지수가 61이상으로 부영양상태(Eutrophic State; $TSI > 60$)인 것으로 보고하였다. 일반적으로 유속이 빠른 하천에서는 외부에서 유입되는 외부기원 유기물이 수중 유기물의 주요한 공급원이 되며, 정체수역인 호소나 하천 하류 및 하구연 등에서는 수중생물의 1차 생산에 의한 자생 유기물이 주공급원이 된다(Kim et al., 2012; Shin, 2009).

부영양화 된 수역에서 BOD농도는 유역으로부터 발생한 유입 BOD 외에도 흐름이 느린 하천 내에서 미처리된 영양염을 이용한 식물플랑크톤의 생산에 의해 공급되는 자생 BOD의 합으로 나타난다. 지금까지 수중 유기물 농도 중 자생 유기물과 관련한 많은 연구가 이루어져 왔다. Fallon and Thomas (1979)에 따르면 ^{14}C 를 이용하여 조류 대발생(Algal bloom)에서 대발생을 이룬 남조류가 BOD_{20} 값의 80% 정도를 차지한다고 보고하였다. Kim and Lee (2001a)는 금강에서 식물플랑크톤의 성장이 COD상승에도 기여할 뿐만 아니라, BOD농도에도 기여하고 있음을 보고 하였다. 이는 물의 흐름이 느린 강 하류에서 부유성 식물 플랑크톤의 대량 증식이 일어날 경우, 이들이 내부 기원성 유기물 증가에 크게 기여할 수 있음을 의미한다.

하천수질은 수체 내에서 오염물질의 화학적, 생물학적, 물리적 작용의 결과로 나타나며, 이런 상호작용을 수식화하여 개발한 수질모형을 이용하여 하천의 수질관리를 위한 정책수립과 운영 그리고 평가를 하는데 활용한다. 하천수질

[†] To whom correspondence should be addressed.
yoon4318@korea.kr

Fig. 1. Study area and location of water quality and water level stations used in the analysis.

Table 1. Sewage treatment plant water quality concentration variation (Unit : mg/L)

Year	MunSan		SaBong		HamAn		GaYa		JinJu	
	BOD	TP	BOD	TP	BOD	TP	BOD	TP	BOD	TP
2007	3.1	1.457	4.8	3.281	2.8	1.553	2.2	1.077	6.9	0.931
2008	2.7	0.936	2.0	1.940	1.9	1.704	3.5	0.813	5.1	0.679
2009	2.9	0.954	2.2	1.061	1.4	1.583	1.6	0.740	3.2	0.620
2010	2.6	1.165	1.8	1.103	1.3	1.376	1.2	0.610	2.4	0.376
2011	1.0	0.502	1.5	0.544	1.0	1.038	1.0	0.292	3.1	0.380

예측에 주로 이용되는 1차원 정상상태 하천수질 모형인 QUAL2E는 전 세계적으로 널리 적용되고 있지만, 조류의 생산 및 사멸에 따른 CBOD의 증가를 고려한 Bottel BOD 개념이 결여되어 있어 정체수역이 많은 우리나라 하천의 특성을 제대로 반영하지 못한다(Choi et al., 2008). 국립환경과학원에서는 이러한 QUAL2E 모형의 한계점을 보완한 QUALKO2 모형을 개발하였다(HRERC (2007)). QUALKO2 모형에서는 Bottel BOD 개념을 추가하여 조류의 생산에 의한 유기물 증가와 실제 정체수역이 많은 하천에서 일어날 수 있는 반응기작을 모의할 수 있도록 보완하였다(Jung, 2009; Kwon, 2009).

본 연구에서는 남강댐 하류유역 본류구간을 대상(Fig. 1)으로 식물플랑크톤 증식에 의한 수중유기물 기여도를 통계적 방법을 통해 분석하고, 아울러 수질예측의 정확도를 통

계적으로 평가하는 것과 보정과 검정을 거친 QUALKO2 모형을 이용하여 향후 남강 하류 구간에서 빈번히 발생하는 부영양현상을 남강댐 방류량 증가 시나리오를 통한 수질예측으로 최적의 수질관리 방안을 제시하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1. 대상유역 하천개황

남강유역은 남강댐을 경계로 남강 상류유역과 하류유역으로 구분되며 남강댐 하류유역은 남강댐을 기점으로 낙동강 합류 전까지의 남강 본류 77.6 km에 해당하며 유역 인구는 343,000명 정도이고 진주시와 진주상평공단 등 중·소도시 및 공업지역이 입지해 있어 오염물질 발생이 상당히 높다(Fig. 1). 낙동강에 대한 남강 하류유역의 BOD, TP 오

염부하기여율은 각각 44.2%, 23.0%로서 매우 높은 편이다 (NRERC, 2009; Yu et al., 2012).

현재 남강 하류유역의 환경기초처리시설은 하수종말처리장이 6개소(총 시설용량 167,000 m³/day), 소규모 마을하수처리시설이 32개소(총 시설용량 1,792 m³/day)가 있으며, 그 외에도 폐수종말처리시설 5개소 등이 운영 중이다. Table 1에서 보는 바와 같이 2007년~2011년까지 최근 5년간 하수종말처리장 방류수 농도를 조사한 결과, 진주하수처리장 BOD, TP 방류수 농도가 2007년 평균 6.9 mg/L, 0.931 mg/L에서 2011년 각각 평균 3.1 mg/L, 0.380 mg/L로 대부분의 처리장 방류수 농도는 목표수질 달성을 위해 지속적으로 개선되었음을 알 수 있다.

2.2. 대상유역 분석자료

본 연구에서는 남강 하류유역에서 조사된 2008년~2012년까지 총 5년간의 모니터링 자료를 분석에 사용하였다. 먼저 수질 자료는 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 측정자료를 이용하였으며, 분석항목은 BOD, COD_{Mn}, TOC, TN, TP, Chl-*a*, Water temperature, pH, DO, Conductivity, Ammonia nitrogen, Nitrate nitrogen, Phosphorate, outflow 등 총 14개 항목을 사용하였고, 유량자료는 국토부(환경부) 정암수위국(남강D)과 거룡강수위국(남강E) 지점의 각 연도별 유출분석을 통해 산출된 일유량자료를 분석에 사용하였다.

강우량자료는 남강유역에 구축된 기상청 티센망의 티센계수값을 이용한 티센평균 일강우량을 분석에 사용하였고, 남강댐 방류량 자료는 국가수자원관리종합정보 인터넷홈페이지(www.wamis.go.kr)에서 수집된 남강댐 본류 일방류량 자료를 분석하여 사용하였다.

2.3. 수질인자간 통계 분석

상관성 분석은 수질인자간 연관성이 있는 수질항목을 파악하기 위하여, 인자간의 상관관계를 분석하여 상호 연관성 높은 인자와 항목을 추출하는 방법이다. 상관계수의 크기가 0에 가까우면 두 변수사이에 상관성이 거의 없으며, 크기가 1에 가까우면 두 변수 사이의 상관성이 매우 높다고 해석한다. 다음으로 상관계수의 부호가 양(Positive)이면 두 변수가 같은 쪽으로 변화하고 음(Negative)이면 두 변수는 반대로 변화한다. 요인분석은 주성분분석법과 최소 고유값 기준(고유값 1이상)으로 요인의 수를 결정하였으며, 각 요인의 특성을 알고자 할 때 유용한 베리맥스(Varimax) 회전방식을 적용하였다.

2.4. 모델의 정확도 평가 방법

모델의 정확도를 평가하기 위해서 Table 2에 제시된 통계값을 사용하였다. 결정계수(Coefficient of determination; R²)는 예측값과 실측값의 선형 회귀관계의 적합도를 결정하는 계수로서 0과 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 적합도 및 모형의 정확도가 높다. 평균제곱근오차(Root mean square error; RMSE)는 예측결과의 평균오차를 나타내는 지표로서 그 값이 0에 가까울수록 즉 값이 작을수록 모형의

Table 2. Statistical indices used to evaluate the model accuracy

Statistical index	Equation	Desired value
Coefficient of determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_f)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_{ave})^2}$	1
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_f - Q_o]^2}$	0

정확도가 높고 모형의 성능도 우수하다고 평가할 수 있다 (Choi. et al., 2008).

3. Results and Discussion

3.1. 남강댐 현황 및 이수기능

남강댐의 주요 시설물은 높이 43 m, 길이 1,126 m의 콘크리트 표면차수벽 석괴댐인 본댐과 문비 3문을 갖춘 여수로, 시설용량 14,000 kW의 발전소, 그리고 홍수시 사천만으로 홍수를 방류하기 위한 높이 31 m, 길이 258 m의 콘크리트 중력식 제수문 구조물 등으로 구성된다. 남강댐의 일반제원으로 유역면적은 2,285.0 km², 저수면적 28.2 km², 유역연평균유입량 64.4 m³/s, 계획홍수위 46.0 EL.m, 상시만수위 41.0 EL.m, 저수위 32 EL.m이다.

남강댐을 취수원으로 광역상수도 사업을 통하여 용수를 공급받는 곳은 통영시, 사천시, 고성군, 진주시, 거제시, 고성군, 하동군, 남해군 등이다. Table 3과 같이 기본계획공급량에 따르면 남강댐은 총 573.3 백만톤 중에서 생·공업용수 224.4 백만톤, 농업용수 226.8 백만톤, 하천유지용수 122.1 백만톤을 공급하는 것으로 계획되어 있다.

물공급량(Water yield)은 특정 근원으로부터 획득할 수 있는 물의 양을 말한다. 대개 침투나 증발이 없다고 가정하면 하천으로부터 최대 공급량은 연평균 유출량과 같게 된다. 이에 따라 남강댐에서 공급가능한 최대 물공급량은 기본계획상으로는 64.4 m³/s이고, Table 4의 최근 5년간 유입량 분석결과로는 73.5 m³/s (25.2~106.2 m³/s)까지 공급할 수 있는 것으로 분석되었다.

3.2. 수문 및 수리 특성분석

Table 4에 요약한 남강하류 유역 강우량을 살펴보면 2012년 기준으로 6월 하순부터 8월 중순까지의 여름철 장마기와 9월에 강우가 집중되어 연강우량(1,788.1 mm)의 약 70.7% (1,264.3 mm)가 이 기간 동안 내렸다. 이에 따라 남강댐 방류량도 증가하였고, 그 결과 하류의 유량도 이때 가장 많았다. 한편 2011년 12월과 2012년 1월~2월까지의 강우량은 매우 적어 가뭄현상을 보였으며 2009년과 2010년 봄철에는 강우 빈도가 산발적으로 많았으나 그 양은 많지 않아 남강댐 방류량과 유량은 적은 양이 방류되고 실측되었다.

남강댐은 남강본류와 사천만방수로를 통하여 방류하고 있다. 남강댐은 농업용수 226.8 백만톤(7.2 m³/s) 및 하천유

Table 3. Summary of supply master plan in Nam River dam

Month	Days	Living and industrial water		Agricultural water		Instream water		Sum	
		m ³ /s	MCM	m ³ /s	MCM	m ³ /s	MCM	m ³ /s	MCM
1월	31	7.1	19.1	0.0	0.0	5.6	15.0	12.7	34.1
2월	28	7.1	17.1	0.0	0.0	6.2	15.0	13.3	32.1
3월	31	7.1	19.1	0.0	0.0	5.4	14.5	12.5	33.6
4월	30	7.1	18.4	0.8	2.1	4.9	12.7	12.8	33.2
5월	31	7.1	19.1	1.2	3.2	4.3	11.5	12.6	33.8
6월	30	7.1	18.4	21.2	55.0	0.0	0.0	28.3	73.4
7월	31	7.1	19.1	22.8	61.1	0.0	0.0	29.9	80.2
8월	31	7.1	19.1	25.1	67.3	0.0	0.0	32.2	86.4
9월	30	7.1	18.4	14.7	38.1	2.3	6.0	24.1	62.5
10월	31	7.1	19.1	0.0	0.0	6.1	16.3	13.2	35.4
11월	30	7.1	18.4	0.0	0.0	6.1	15.8	13.2	34.2
12월	31	7.1	19.1	0.0	0.0	5.7	15.3	12.8	34.4
Sum		85.2	224.4	85.8	226.8	46.6	122.1	217.6	573.3
Average		7.1	18.7	7.2	18.9	3.9	10.2	18.1	47.8

Table 4. Summary of Inflow, outflow, surface flow and precipitation in the Nam River during January, 2008 - December, 2012

(a) Inflow : Nam River dam														(m ³ /s)
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum	Mean
2008	17.8	10.6	11.7	23.7	14.4	115.3	59.3	24.0	8.1	6.8	5.2	5.5	302.4	25.2
2009	4.4	8.4	12.0	12.2	29.4	27.8	364.1	48.7	11.9	10.1	7.0	9.0	545.1	45.4
2010	7.5	42.1	46.0	68.1	72.7	12.6	242.1	423.5	310.0	26.0	12.6	11.3	1,274.4	106.2
2011	8.2	14.1	18.1	31.0	83.6	159.6	474.1	285.4	25.8	17.8	42.8	27.6	1,188.2	99.0
2012	11.2	8.7	33.8	92.5	22.0	8.4	165.5	326.0	342.7	27.6	25.7	34.7	1,098.8	91.6
Mean	9.8	16.8	24.3	45.5	44.4	64.7	261.0	221.5	139.7	17.6	18.7	17.6	881.8	73.5
(b) Outflow : main stream flow of Nam River dam outlet														(m ³ /s)
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum	Mean
2008	14.5	18.2	21.9	21.3	25.0	65.7	89.5	16.2	6.6	4.3	1.9	1.8	287.1	23.9
2009	1.9	1.9	4.2	8.8	19.5	30.7	160.8	65.7	19.1	7.0	4.8	3.8	328.1	27.3
2010	3.8	7.6	51.6	51.3	72.5	41.5	84.0	172.9	126.9	29.5	12.5	12.1	666.2	55.5
2011	12.0	10.1	6.8	27.8	66.6	57.9	173.8	134.7	21.8	8.1	27.9	27.2	574.7	47.9
2012	10.8	12.3	23.7	83.3	38.4	17.6	91.0	152.1	185.2	28.0	22.9	37.9	703.2	58.6
Mean	8.6	10.0	21.6	38.5	44.4	42.7	119.8	108.3	71.9	15.4	14.0	16.6	511.8	42.7
(c) Surface flow : flow of Nam River watershed														(m ³ /s)
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum	Mean
2008	42.0	44.0	47.1	49.6	99.8	224.9	247.6	75.8	30.0	17.3	5.0	5.6	888.7	74.1
2009	10.5	10.6	13.9	37.3	185.6	124.7	320.0	182.6	84.8	113.7	10.7	9.1	1,103.6	92.0
2010	5.1	21.6	65.5	79.2	102.5	38.7	145.3	241.3	208.6	29.0	10.1	9.2	956.1	79.7
2011	15.3	13.5	12.5	32.0	98.7	90.9	398.0	233.5	27.6	15.7	43.7	34.4	1,016.0	84.7
2012	18.3	19.0	43.5	144.1	57.8	23.5	144.4	238.6	350.3	40.4	32.7	53.5	1,165.9	97.2
Mean	18.2	21.8	36.5	68.4	108.9	100.6	251.1	194.4	140.3	43.2	20.5	22.4	1,026.0	85.5
(d) Precipitation : precipitation of Nam River watershed														(mm)
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum	Mean
2008	47.4	5.5	44.0	67.6	90.3	298.9	85.3	102.2	23.0	28.2	11.6	3.6	807.6	67.3
2009	9.2	58.3	59.6	83.4	133.5	163.6	578.3	90.6	37.7	35.3	37.9	28.0	1,315.4	109.6
2010	26.5	131.1	100.4	154.9	147.6	50.1	477.3	445.7	322.1	66.4	6.7	25.3	1,954.1	162.8
2011	0.1	74.7	25.1	122.9	149.2	294.4	564.1	363.8	37.9	77.8	155.8	4.8	1,870.6	155.9
2012	11.6	9.0	113.6	169.5	46.8	42.8	337.8	485.6	398.1	40.3	57.1	75.9	1,788.1	149.0
Mean	19.0	55.7	68.5	119.7	113.5	170.0	408.6	297.6	163.8	49.6	53.8	27.5	1,547.2	128.9

Table 5. Main stream flow of Nam River dam outlet

Year	Hydro-power flow	Spillway flow	outflow
	①	②	③=①+②
2008	20.1	3.8	23.9
2009	17.7	9.6	27.3
2010	38.9	16.6	55.5
2011	31.3	16.6	47.9
2012	37.0	21.6	58.6
Mean	29.0	13.6	42.7

지용수 122.1 백만톤($3.9 \text{ m}^3/\text{s}$)을 연간 348.9 백만톤($11.1 \text{ m}^3/\text{year}$)을 공급하는 것으로 계획되어 있다. Table 5와 같이 남강댐이 본류로 방류하는 물의 양은 발전방류량과 여수로방류량의 합이며, 일반적으로 발전방류는 농업용수와 하천유지용수를 공급하며, 여수로방류는 홍수피해저감을 위하여 방류한다. Table 5의 남강댐 본류 연간 방류량을 살펴보면, 발전방류량의 평균은 915.0 백만톤($29.0 \text{ m}^3/\text{s}$)으로 농업용수와 하천유지용수 연간 계획공급량 348.9 백만톤($11.1 \text{ m}^3/\text{s}$)을 훨씬 넘는 것으로 나타났다. 하지만 Table 4의 월별 방류량을 살펴보면 위 계획공급량 이하의 월이 1월~4월과 10월~12월에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 여수로 방류는 주로 비가 많이 내리는 우기(6월~9월)에 이루어지기 때문에 그 외 월의 방류량은 모두 발전방류량에 해당하는 것으로 남강하류 수질개선을 위해서는 추가적인 댐 방류량 증가가 필요할 것으로 판단된다.

하천의 수질은 물리적 특성, 즉 수리·수문학적 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 오염총량제 2단계 기준유량은 1995년~2004년까지 통합모형화 기법으로 구축한 SWAT 모형을 이용하여 자연유량 및 댐 방류로 인한 효과와 물수지 요소에 의한 영향 등을 고려하여 10년 평균 저수량(Q_{275})을 기준으로 낙동강 수계 41개 오염총량관리 단위유역별로 기준유량이 산정되었으며, 275번째 해당하는 유량 즉 365일 중 275일 이상을 유지하는 최소유량으로 초과확률(Exceedance

Table 6. Hydrologic condition used in the Boundary condition of HEC-RAS

Station	Q_{95}	Q_{185}	Q_{275}	Q_{355}
Nam River C	46.4	20.8	9.2	4.7
Nam River D	32.5	14.7	7.3	2.8
Nam River E	61.4	27.7	13.8	5.3

Probability) 75%에 해당하는 유량을 의미한다. 저수량을 기준 유량으로 선정한 것은 저수량보다 유량이 풍부한 경우에는 목표수질을 만족할 수 있다는 의미로 볼 수 있다(GNDI, 2010).

Table 6과 같이 지난 5년간(2008년~2012년)의 실측유량 자료를 바탕으로 유황분석을 실시한 결과 남강D(남강2A) 지점의 저수량은 $Q_{275} = 7.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 남강E(남강4-1) 지점의 저수량은 $Q_{275} = 13.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 나타났다. 오염원으로부터 배출되는 오염물질의 양이 동일하다고 가정한다면, 유량이 저수량(Q_{275}) 이하일 때 측정된 수질은 높게 나타날 가능성이 있다. 실제로 상기 조건에서 저수량 이하에서 측정된 수질을 선별하여 조사한 결과 남강D 지점의 평균 수질농도는 $\text{BOD} = 3.9 \text{ mg/L}$, 남강E 지점의 평균 수질농도는 $\text{BOD} = 4.2 \text{ mg/L}$ 로 목표수질 남강D($\text{BOD} = 2.5 \text{ mg/L}$)와 남강E($\text{BOD} = 3.1 \text{ mg/L}$)를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 저수기에 해당하는 평균유속을 선별하여 조사한 결과 남강댐 하류 평균유속은 0.19 m/s 정도의 저유속으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 남강댐 하류로의 하상경사 및 유속분포 그리고 유하시간을 산정하고자 HEC-RAS 모형을 이용하였으며, 오염총량제 2단계 기본계획에 적용된 단면자료를 활용하였다.

경계조건(Boundary Condition)은 앞서 수집·분석된 남강댐 방류량 자료 및 수위국 지점들에서 분석된 일평균유량을 통해 산출된 유황분석 결과값을 상류단 경계값으로 사용하였으며, 하류단 경계조건은 Nomal Depths($=0.000271$)을 적용하였다. 각 단위유역별 산출된 최종 유황분석결과를 Table 6과 같다.

HEC-RAS 모형을 이용하여 남강댐 하류의 유속을 모의한

Fig. 2. Hydraulic residence time simulation in the Nam River watershed.

Fig. 3. Location of dam and example vertical grid of a selected in the Nam River watershed.

결과 저수기(Q_{275})기준 남강D(남강2A) 부근은 0.10 ㎍, 남강 E(남강4-1) 부근은 0.16 ㎍로 실측한 자료와 매우 근사한 값을 나타내었다. 산정된 유하시간은 5.6 day로 2009년 안동조정지댐으로부터 하구까지 물이 도달하는데 대략 12 day이 소요되는 것으로 산정된 것을 감안할 때 상당히 긴 시간으로 나타났다(Fig. 2 참조)(Choi et al., 2008).

Fig. 3에서 보듯 남강댐 하류로 내려 갈수록 하상 경사가 매우 완만하며 다수의 수중보와 교량 등 인공 구조물과 만곡흐름의 특징으로 저유속으로 인한 강의 유하시간이 증가하는 것으로 분석되었다. 하천에서의 유하시간 증가는 곧

체류시간의 증가를 의미한다. 따라서 남강댐의 방류량이 적은 늦가을부터 다음해 봄까지의 갈수기에 남강 하류 수역의 유속도 매우 느려져 이런 조건은 남강 하류 수역에서 식물플랑크톤의 증식을 촉진 할 것으로 예상된다.

3.3. 시·공간적 변동특성

남강댐 직하류인 남강C(남강)의 수질은 2008년~2012년까지 거의 변화가 없었고, Fig. 4에 나타난 남강댐 하류 수질측정망 지점에서의 최근 5년간 연평균 분포를 보면 남강 하류로 갈수록 BOD, TP, TN, Chl-a의 농도가 높아지는 것을 알 수가 있다.

특히, Chl-a의 경우 단위유역 남강D(남강2A)지점을 지나면서 급격히 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 지형적으로 경사가 완만해지는 중·하류부에서 강의 흐름(유속)이 느려지면서 체류시간이 길어져 미처리된 유기오염물질과 질소, 인 등 과량의 영양염류가 집적되면서 수체 내 부유성 식물플랑크톤이 대량 증식하는 현상을 초래한 것으로 추정된다.

남강댐 하류 단위유역 남강D(남강2A)지점의 BOD농도는 2009년 평균 3.6 mg/L에서 2012년 평균 1.9 mg/L로 남강E(남강4-1)지점의 BOD농도는 2009년 평균 4.3 mg/L에서 2012년 평균 2.4 mg/L로 수질이 개선되어진 것으로 조사되었다. 하지만 Fig. 5에 도시한 바와 같이 월평균 BOD값을

(a) BOD

(b) Chl-a

(c) TN

(d) TP

Fig. 4. Comparison of water quality mean values of each sampling stations during January, 2008 - December, 2012.

Fig. 5. Monthly variation of BOD in Nam River D and Nam River E stations during January, 2008 - December, 2012.

살펴보면 두 지점 모두 대체로 1월~5월까지 높은 BOD 값을 보여 봄철 유기물 오염도가 높은 것으로 나타났다. 또한 강우가 집중되는 6월 하순에서 8월 중순 풍수기와 9월에서 11월 평수기를 제외하고 12월부터 저·갈수기인 봄철 5월까지 지속적으로 수질이 악화되어 목표수질 남강D(BOD = 2.5 mg/L)와 남강E(BOD = 3.1 mg/L)를 초과하는 것으로 나타났다. 일반적으로 강우량이 많을 때 하천은 세척효과로 정화되지만 선행무강우일수가 길면 하천은 대부분 하·폐수로 이루어지면서 오염물질이 하천에 집적되어 수질오염은 심화될 수밖에 없다.

Fig. 4에서 BOD와 Chl-*a*의 경우 상류에서 하류로의 수질 분포 특성을 보았을 때 남강댐 하류 수역은 농도가 비교적 낮은 구간 (a)상류(남강, 남강1, 남강2), 농도가 증가하는 구간 (b)중류(남강2A, 남강3), 높은 농도가 유지되는 구간 (c)하류(남강4, 남강4-1) 구간으로 구분되어진다. 이를 바탕으로 수질조사 기간 동안 각 구간별 이화학적 수질값의 최대, 최소값 및 평균값을 Box Plot 형태의 통계값으로 표시하여 나타내었다(Fig. 6 참조). 유기물 오염지표인 BOD, COD_{Mn}, TOC 분포 특성을 살펴보면 BOD의 중앙값은 1.0~2.6 mg/L, 제1사분위수(25%)는 0.8~1.7 mg/L, 제3사분위수(75%)는 1.3~4.2 mg/L의 농도 범위를 보이고 있으며, 중 하류로 내려가면서 농도가 증가하고, 농도 변동 폭도 커지는 것으로 나타났다. COD_{Mn}, TOC의 경우 상류에서 하류까지의 농도 변화는 BOD와 비슷한 경향을 보이며 농도분포가 중앙값에 밀집된 분포를 보이고 있다. TP의 제1사분위수는 0.01~0.072

mg/L(7.2배), 제3사분위수는 0.03~0.135 mg/L(4.5배), 중앙값은 0.02~0.1 mg/L(5배) 증가한 농도를 보이고 있다. TN은 사분위범위가 중앙값을 기준으로 저 농도로 분포되어 있는 밀집형태를 보이고 있다. 식물플랑크톤 현존량 지표인 Chl-*a*의 최소 10 %percentile 값과 최대 90 %percentile 값은 상류에서 하류로 각각 2.40~12.87 µg/L, 5.44~76.83 µg/L, 6.10~103.6 µg/L로 다량의 영양염 유입과 완만한 하상구배의 느린 흐름으로 Chl-*a* 농도의 증가 범위가 연중 2.5~185.8 µg/L로 매우 큰 변동 폭을 보이고 있으며, 중앙값을 기준으로 흩어짐 정도가 매우 크게 나타났다.

3.4. 상관성 분석

남강댐 하류 수역에서의 수질관측자료의 통계분석을 위해 SPSS 12.0 통계 프로그램을 사용하여 항목 간 상관관계를 분석하였다. 통계분석을 실시하기 전에 주요 수질항목이 정규분포를 따르는지를 검토하였으며, 정규분포를 따르지 않는 항목에 대해서는 적절한 자료의 변환을 검토하였다. 하지만 원 자료의 관측치들이 정규분포를 따르는 경우에는 보다 더 의미가 있겠으나, 이러한 정규성의 가정이 반드시 필요한 것은 아니다(Kim et al., 2007). 그러므로 본 연구에서는 자료의 변환 없이 원 자료를 그대로 표준화시킨 후 분석하였다.

남강하류 유역에서 조사된 인자별 상관분석 결과를 Table 7에 (a)상류, (b)중류, (c)하류 순으로 나타내었다. 상류 구간에서 WT($r = 0.421$), BOD($r = 0.340$)가 Chl-*a* 농도와 작지만

Fig. 6. Box-plots of water quality parameter in each group during January, 2008 - December, 2012.

Table 7. Pearson correlation coefficients between water quality parameters of each water groups (N=60)

Reach	Variable	Outflow	WT	pH	DO	Cond	BOD	COD	TOC	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P	Chl- <i>a</i>
(a) Upstream	Outflow	1.000	0.474**	-0.478**	-0.278**	-0.263*	-0.132	0.256*	-0.123	-0.133	-0.234	0.060	0.241	0.217	0.168
	WT		1.000	-0.265*	-0.685**	-0.100	0.126	0.407**	0.215	-0.158	-0.227	-0.342**	0.249	0.063	0.421**
	pH			1.000	0.289*	0.199	0.018	-0.511**	-0.050	-0.034	0.069	-0.003	-0.283	-0.123*	-0.138
	DO				1.000	0.084	0.001	-0.390**	-0.101	-0.014	-0.036	0.193	-0.216	-0.053	-0.175
	Cond					1.000	0.238	-0.204	0.241	0.572**	0.770**	-0.129	0.055	0.168	0.160
	BOD						1.000	0.367**	0.373**	0.106	0.216	-0.382**	0.014	-0.136	0.340**
	COD							1.000	0.275*	-0.021	-0.030	-0.270*	0.410**	0.165	0.177
	TOC								1.000	0.090	0.178	-0.271**	0.370**	0.027	0.184
	TN									1.000	0.718**	0.072	0.165	0.227	-0.107
	NH ₃ -N										1.000	-0.113	0.086	0.216	0.028
	NO ₃ -N											1.000	-0.043	0.165	-0.240
	TP												1.000	0.520**	0.033
	PO ₄ -P													1.000	-0.005
	Chl- <i>a</i>														1.000
Reach	Variable	Outflow	WT	pH	DO	Cond	BOD	COD	TOC	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P	Chl- <i>a</i>
(b) Midstream	Outflow	1.000	0.503**	-0.373**	-0.431**	0.057	-0.288**	-0.280*	-0.103	-0.322*	-0.339**	-0.222	-0.160	-0.254*	-0.177
	WT		1.000	0.029	-0.439**	0.057	0.003	0.180	0.116	-0.676**	-0.565**	-0.798**	-0.101	-0.397**	0.293*
	pH			1.000	0.352**	0.076	0.609**	0.486**	0.112	0.135	0.197	-0.030	0.174	0.077	0.520**
	DO				1.000	0.126	0.286*	0.153	-0.062	0.408**	0.334**	0.489**	0.052	0.102	0.231
	Cond					1.000	0.280*	0.147	0.127	0.155	0.181	0.036	0.065	-0.001	0.151
	BOD						1.000	0.835**	0.559**	0.464**	0.459**	0.084	0.563**	0.250	0.738**
	COD							1.000	0.616**	0.279*	0.254	-0.152	0.561**	0.201	0.737**
	TOC								1.000	0.441**	0.405**	0.044	0.525**	0.235	0.413**
	TN									1.000	0.868**	0.726**	0.526**	0.484**	0.097
	NH ₃ -N										1.000	0.507**	0.614**	0.585**	0.032
	NO ₃ -N											1.000	0.069	0.213	-0.148
	TP												1.000	0.743**	0.300*
	PO ₄ -P													1.000	-0.098
	Chl- <i>a</i>														1.000
Reach	Variable	Outflow	WT	pH	DO	Cond	BOD	COD	TOC	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P	Chl- <i>a</i>
(c) Downstream	Outflow	1.000	0.518**	0.147	-0.415**	-0.580**	-0.338**	-0.253	-0.124	-0.436**	-0.314*	-0.354**	-0.085	-0.132	-0.042
	WT		1.000	0.064	-0.638**	-0.488**	-0.066	0.147	0.187	-0.789**	-0.556**	-0.867**	0.126	-0.060	0.311*
	pH			1.000	0.183	0.342**	0.501**	0.343**	0.222	0.093	0.064	0.066	-0.010	-0.169	0.547**
	DO				1.000	0.478**	0.182	-0.022	-0.109	0.551**	0.331**	0.644**	-0.162	-0.079	0.019
	Cond					1.000	0.564**	0.477**	0.411**	0.635**	0.519**	0.503**	0.227	0.206	0.279*
	BOD						1.000	0.780**	0.642**	0.458**	0.490**	0.153	0.389**	0.118	0.718**
	COD							1.000	0.784**	0.250	0.226	-0.051	0.450**	0.152	0.766**
	TOC								1.000	0.269*	0.324*	-0.027	0.536**	0.287*	0.606**
	TN									1.000	0.792**	0.845**	0.260*	0.199	0.064
	NH ₃ -N										1.000	0.549**	0.381**	0.467**	0.016
	NO ₃ -N											1.000	-0.081	-0.030	-0.156
	TP												1.000	0.687**	0.240
	PO ₄ -P													1.000	-0.175
	Chl- <i>a</i>														1.000

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

통계적으로 유의한 양의 상관관계($p < 0.01$)를 나타냈다. 증류 구간과 하류구간에서는 pH($r = 0.547$), BOD($r = 0.718$), COD_{Mn}($r = 0.766$), TOC($r = 0.606$) 등이 Chl-*a* 농도와 높은 양의 상관관계($p < 0.01$)를 가짐으로써 조류성장에 따른 자생 유기오염물질과의 관련성을 추정해 볼 수 있다. 또한 댐(분류)방류량과 BOD($r = 0.388$)와는 작지만 통계적으로 유의한 음의 상관관계($p = 0.01$)로 나타나 방류량에 의한 오염원 제어 효과가 있는 것으로 판단된다. pH와 Chl-*a* 농도가 높은 상관성을 보인 것은 조류의 성장과 관련한 pH의 변화로 설명할 수 있다. 조류의 경우 광합성이 활발하면 수중의 용존산소를 증가시키는 한편 조류의 증식으로 인한 CO₂의 소모에 따라 탄산염 시스템(Carbonate system)의 역반응으로 H⁺이온이 감소하면서 pH를 상승시키는 결과로 나타난다. 즉, 대기 중 CO₂가 수중으로 녹아들면, 탄산(H₂CO₃)이 형성되며, 이는 다시 수소이온(H⁺)과 중탄산염(HCO₃⁻)으로 분해되는데, 이 중 중탄산염은 수중식물(조류)의 광합성 시 CO₂흡수의 주된 형태이므로 식물플랑크톤이 증식하면서 광합성 양이 증가할수록 중탄산염 흡수가 증가되어 수소(H⁺)이온의 양은 계속 감소하게 된다. 이는 결국 수체의 pH 증가를 유발하게 된다. 또한 BOD, COD_{Mn}, TOC 등이 Chl-*a*와 높은 인자 부하량을 가짐으로써 조류성장에 따른 자생 유기오염물질의 발생을 나타내고 있다. 그리고 전기전도도와 NH₃-N($r = 0.519$), NO₃-N($r = 0.503$)가 양의 상관관계($p < 0.01$)로 나타나 수중에서 유기물과 함께 전해질로 작용함을 알 수 있다. 한편 NO₃-N과 PO₄-P는 음의 관계를 보여 식물플랑크톤 증식과정에서 우선적으로 소비되는 이들 무기영양염류는 식물플랑크톤의 증식 과정에서 소모되어 음의 상관을 나타낸 것으로 추정된다. 또한 남강댐 하류 구간에서 영양염류 농도와 Chl-*a*가 뚜렷한 상관성을 보이지 않고 있다. 이는 하류 수역에 영양염류 농도가 식물플랑크톤이 증식하기에 이미 충분한 상태이기 때문인 것으로 판단된다. 조류발생의 필요조건인 인 농도는 미국 EPA 기준으로 0.02 mg/L, OECD 기준으로 0.035 mg/L로(Kim, 2012) 앞서 구간에서 조사된 인 농도는 (a)상류(0.028 ~ 0.107 mg/L), (b)중류(0.073 ~ 0.152 mg/L), (c)하류(0.071 ~ 0.128 mg/L)로 이미 충분한 상태이다. 한편, 상류구간에서 하류구간까지 TN/TP의 질량비(TN:TP mass ratio)를 보면 각 지점에서 조사기간 평균 54.7, 37.4, 38.1 (범위: 6.2 ~ 757.3)의 비를 보였고, 특히 상대적으로 TP 농도가 낮았던 하천구간에서 더 높은 비를 보여 전 지점에서 모두 인이 제한영양염인 것으로 조사되었다(Forsberg and Ryding,

1980). 일반적으로 TN과 TP의 질량비가 16 이하일 경우 총질소가 제한요인으로 작용하고, 29 이상일 경우 TN에 비하여 총인의 부족으로 1차 생산력에 영향을 미칠 수 있는 잠재성을 갖고 있는 것으로 판단되며 세 구간 모두 TN과 TP의 질량비가 평균 29 이상으로 인이 제한(P-limitation) 요인으로 나타났다(Park et al., 2013). 또한, 조사기간 평균 값으로 볼 때 각 지점에서 TP농도는 0.06 mg/L, 0.11 mg/L, 0.1 mg/L로 부영양 기준을 초과하였다.

남강댐 하류유역 총 세 구간에서 인(P)이 제한영양염인자인 것으로 조사되었고, 식물플랑크톤 증식에 영향을 미치는 인자인 것으로 판단이 되나, 강우 및 상류 댐의 방류량 증가로 인한 유속의 증가(체류시간 감소) 또한 중요한 영향을 미치는 것으로 추정된다. 조류의 발생원인은 영양염류의 과다 이외에도 수리학적 인자인 유속, 체류시간, 강우량과 이화학적 인자인 수온, 태양광량, 영양염류, 그리고 생물학적 인자들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서 저·갈수기 시에 남강댐 방류량이 하천유지유량인 발전방류량이 줄어들어 유속이 느려지면, 하류로는 상류에서 흘러내려온 하·폐수가 집적되어 수질이 악화되는 현상을 초래할 것으로 판단된다. 앞서 언급한 수질 특성분석에서 월별 BOD농도를 분석한 결과 봄철 유기물 오염도가 높은 것으로 나타났는데 이는 상기시기와 일치하는 현상으로 볼 수 있다.

한편 월별 방류량에 따른 BOD와 Chl-*a*의 상관관계 분석을 실시한 결과 1월($r = 0.840$)($r = 0.783$)과 2월($r = 0.833$)($r = 0.757$), 5월($r = 0.751$)($r = 0.658$)이 가장 높은 음의 상관관계($p < 0.01$)로 나타났으며, 3월($r = 0.586$)($r = 0.430$)과 4월($r = 0.509$)($r = 0.472$)이 그 다음 순으로 나타났다(Table 8 참조). 강우가 집중되고 유량이 많아 유속이 빠른 7월과 8월은 음의 관계이지만 유의성은 작은 것으로 분석되었으며, 강우 후 수체가 안정화된 9월과 10월은 유의성이 없는 것으로 나타났다. 대체로 하천에 유량이 작고 유기물 오염도가 높은 시기에 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 위 결과로 볼 때 남강댐 방류량 증가에 따라 오염농도가 감소하는 것은 분명한 것으로 판단된다. 따라서 남강댐 중·하류 구간의 유기물 오염관리를 위해서는 봄철 수중에서 식물플랑크톤의 증식과 더불어 오염부하량의 제어가 매우 중요하며 이를 위해서는 남강댐의 수문조작을 통한 적절한 유량에 의한 유속을 유지해 주는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 미국 Patuxent River 하구의 연구에서 겨울철 조류 발생이 질소(N) 제한조건과 관련이 있으며, 유속증가에 따라 조류 발생이 사라짐을 보고하였다(Sohn et al., 2013).

Table 8. The results pearson correlation coefficients between Outflow and BOD and Chl-*a*

	Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
r	BOD	-0.840**	-0.833**	-0.586**	-0.590**	-0.751**	-0.308
r	Chl- <i>a</i>	-0.783**	-0.757**	-0.430**	-0.472**	-0.658**	-0.482**
	Month	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
r	BOD	-0.486	-0.588*	-0.603*	-0.295**	-0.588**	-0.467**
r	Chl- <i>a</i>	-0.540*	-0.620*	-0.490	-0.198	-0.484**	-0.482**

** : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

3.5. 주성분 및 요인 분석

분류된 세 구간은 서로 다른 수질특성을 나타내므로 각 구간의 수질특성을 파악하기 위하여 주성분 분석 및 요인 분석을 실시하여 그 결과를 Table 9와 10에 나타내었다 (Bernard et al., 2004; Kim et al., 2007; Shin et al., 1997; Yoo, 2002). 주성분 수를 결정하기 위해서 고유치(eigenvalue)가 1.0 이상인 값을 갖는 주성분 축만을 고려하여 상류 4개, 중·하류 3개의 요인을 추출하였다. 주성분 전체 수질 변동에 대하여 (a)상류 78.531%, (b)중류 78.394%, (c)하류 75.669%를 설명하고 있다.

상류 구간에서 제 1요인은 31.161%, 제 2요인은 52.722%, 제 3인은 68.591%, 제 4요인은 78.531%를 기여하고 있고, 제 1요인은 $\text{NH}_3\text{-N}$, Cond, TN로 분류되었고, 제 2요인은 수온(WT), 제 3요인은 BOD로 분류되었다. 중류 구간에서 제 1요인은 27.000%, 제 2요인은 53.461%, 제 3인은 78.394%를 기여하고 있고, 제 1요인은 $\text{NH}_3\text{-N}$, 제 2요인은 Chl-*a*, BOD, COD_{Mn} , pH, 제 3요인은 TP로 분류되었다. 하류 구간에서 제 1요인은 31.835%, 제 2요인은 58.616%, 제 3인은 75.669%를 기여하고 있고, 제 1요인은 $\text{NO}_3\text{-N}$, TN, DO, 제 2요인은 Chl-*a*, COD_{Mn} , BOD, TOC 제 3요인은 $\text{PO}_4\text{-P}$, TP로 분류되었다.

상류 구간에서는 암모니아성 질소, 총질소와 전기전도도가 제 1요인으로 분류되었고, 수온이 제 2요인으로 유기물 요인인 BOD가 제 3요인으로 분류되어 진주 도시 및 공업 지역 오염특성을 잘 나타내는 것으로 보이며, 중류와 하류 구간은 암모니아성 질소가 제 1요인으로 공통 분류되었고,

BOD, COD_{Mn} , Chl-*a*가 제 2요인으로 공통 분류되었다. 이와 같은 결과로 볼 때 남강 중·하류구간의 수질은 조류 증식에 따른 자생 유기오염물질의 발생이 수질 오염의 요인인 것을 확인할 수 있었다. 이는 상류 도시지역의 생활하수가 흘러내려오면서 하류지역에 도달하여 누적됨에 따라 도시특성과 농가의 축산폐수 및 토지이용에 따른 유기오염물질과 영양염류 유출로 오염도가 극대화됨에 수질관리에 있어서 가장 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

3.6. 방류량 증가에 따른 수질개선 효과

본 연구에서는 2단계(2011년~2015년) 오염총량관리 기본계획수립에서 사용된 바 있는 QUALKO2 모형을 이용하여 남강댐 방류량 변화에 따른 남강댐 하류 지역의 수질개선 효과를 분석하였다. 먼저 신뢰성 있는 수질모형을 구축하기 위해서는 대상하천의 유속 및 수심과 같은 수리학적 특징이 모형에 잘 구현되어야 한다. 따라서 Reach별 수리학적 계수는 낙동강 오염총량관리 2단계 기본계획에 적용된 단면자료를 이용하여 $V = aQ^b$, $H = aQ^b$ 의 관계식으로부터 도출된 수리계수 값을 적용하였다. Reach는 수리분석 결과에 근거하여 하천 내 수리특성이 유사한 구간을 일정하게 구분하여 14개 구간으로 나누었으며, 소구간 Element 길이는 1 km 등간격으로 구분하였다. 남강 본류에 유입되는 하·폐수처리시설과 취·양수장 및 지류하천은 위치를 확인하여 모두 점오염원 형태로 모형에 적용하였으며, 그 외에 비점오염원으로 각 소유역의 유달부하율(유달율)을 고려하여 수체에 유입하는 것으로 모형을 구성하였다(Gyeong-

Table 9. Initial eigenvalues explain of factor

Component	(a) Upstream		(b) Midstream		(c) Downstream	
	% of Variance	Cumulative %	% of Variance	Cumulative %	% of Variance	Cumulative %
1	31.161	31.161	27.000	27.000	31.835	31.835
2	21.561	52.722	26.461	53.461	26.781	58.616
3	15.869	68.591	24.933	78.394	17.053	75.669
4	9.940	78.531				

Table 10. Rotated factor matrix extracted from principal component analysis

Var.	(a) Upstream			Var.	(b) Midstream			Var.	(c) Downstream		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3		Factor 1	Factor 2	Factor 3		Factor 1	Factor 2	Factor 3
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.913	-0.061	0.132	WT	-0.898	0.198	-0.160	WT	-0.929	0.230	0.047
Cond.	0.879	-0.052	0.197	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.863	-0.157	0.109	$\text{NO}_3\text{-N}$	0.906	-0.069	-0.099
TN	0.825	-0.059	-0.058	DO	0.715	0.403	-0.176	T-N	0.892	0.179	0.229
WT	-0.144	0.841	0.231	T-N	0.714	0.101	0.585	DO	0.762	0.054	-0.285
DO	-0.038	-0.765	-0.055	Outflow	-0.520	-0.435	-0.069	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.683	0.150	0.493
Outflow	-0.210	0.625	-0.297	Chl- <i>a</i>	-0.145	0.863	0.081	Cond	0.683	0.475	0.152
Chl- <i>a</i>	0.081	0.531	0.380	BOD	0.117	0.802	0.429	Outflow	-0.595	-0.086	-0.144
BOD	0.131	0.027	0.789	COD	-0.131	0.798	0.443	Chl- <i>a</i>	-0.116	0.923	-0.079
TOC	0.108	-0.068	0.697	pH	0.155	0.793	-0.040	COD	0.042	0.867	0.292
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.021	-0.274	-0.658	T-P	0.032	0.250	0.892	BOD	0.280	0.931	0.196
TP	0.087	0.083	0.142	$\text{PO}_4\text{-P}$	0.257	-0.060	0.780	TOC	0.007	0.729	0.476
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.300	0.029	-0.238	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.600	0.094	0.667	pH	0.073	0.669	-0.339
COD	-0.194	0.347	0.444	TOC	-0.110	0.346	0.653	$\text{PO}_4\text{-P}$	0.095	-0.085	0.882
pH	0.142	-0.439	0.052	Cond	0.112	0.140	0.004	T-P	-0.016	0.296	0.840

Rotation method : Varimax with Kaiser Normalization

Fig. 7. Sensitivity analysis of Nam River QUALKO2 according to μ_{max} .

SangNamDo, 2009; Jung et al., 2013). 유달울은 2단계 오염총량관리 기본계획수립에서 산정된 자료를 이용하여 각 소유역의 하단부에서 점오염원으로 유입되는 형태로 모형에 적용하였다.

모형에서 반응계수의 결정은 실측을 통해 산정하여야 하나 이는 불가능할 뿐만 아니라 많은 오차가 포함될 가능성이 크다. 따라서 대부분 수질모형에서 반응계수 추정은 자연현상과 수학적인 해석간의 차이가 최소가 될 때까지 시행착오법을 반복하여 최적의 반응계수를 결정하게 된다. 따라서 모형의 보정 수질은 기준유량(Q_{275})과 가장 유사한 시기인 2008년 3월 환경부 수질 측정망 자료의 평균값을 이용하였으며 BOD, TN, TP, Chl-a 항목에 대해 수질모형인자의 민감도 분석을 통한 보정을 실시하였다. 민감도 분석은 수질모형인자를 10~50% 비율로 변화시키면서 모형을 실행 마지막 Element에서 BOD, TN, TP, Chl-a 등 대부분

의 수질항목에서 영향정도가 크게 나타난 변수를 중심으로 실측값을 근거로 보정하였다. 민감도 분석 결과 K_1 (BOD 분해율 계수), K_3 (침전에 의한 BOD 제거율), σ_1 (조류의 침전율), μ_{max} (조류 최대 성장률), ρ (조류의 호흡율), σ_2 (용존성 P의 하상 용출율, 용존인의 저질 용출율) 등의 수질모형인자에 민감하게 반응하였다(Fig. 7과 Table 11 참조) 이처럼 조류의 성장 및 사멸에 민감하게 반응하는 이유는 QUALKO2 모형이 조류의 성장에 의한 유기물의 내부 재생산을 적절하게 잘 모의하고 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 8에서 보듯이 BOD와 Chl-a의 경우 하류로 가면서 농도가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 남강 중·하류에서 조류의 성장에 의한 유기물질의 내부 생산이 원인인 것으로 추정된다. 앞서 언급한 Fig. 5와 Fig. 7에 도시한 바와 같은 경향으로 모형 예측에서도 이러한 현상을 잘 모의하고 있다.

Table 11. Summary of sensitivity analysis of Nam River QUALKO2

Var.	Description	Value used of model	Input change (%)	Response value at the last element of the last reach			
				BOD	TP	TN	Chl-a
K_1	Carbonaceous deoxygeneration rate constant (0.02~3.4)	0.08	50	0.812	0.000	0.000	0.000
			-50	-0.592	0.000	0.000	0.000
K_3	Rate of loss of BOD due to settling (-0.36~0.36)	-0.30	50	0.267	0.000	0.000	0.000
			-50	-0.335	0.000	0.000	0.000
σ_1	Algal settling rate (0.15~1.8)	1.3	50	-0.446	-0.002	-0.021	-23.520
			-50	0.344	0.001	0.010	18.810
μ_{max}	Maximum algal growth rate (1~3)	3	10	0.994	-0.200	-1.800	30.330
			-10	-0.809	0.200	-4.400	-41.660
ρ	Algal respiration rate (0.05~0.5)	0.15	50	0.629	0.001	0.006	-26.250
			-50	-0.197	-0.001	-0.012	20.450
K_N	Michaelis-menton half saturation constant for nitrogen (0.01~0.3)	0.02	50	-0.173	0.000	-0.028	0.000
			-50	-0.019	0.000	-0.042	0.000
K_P	Michaelis-menton half saturation constant for phosphorus (0.001~0.05)	0.002	50	-0.011	-0.003	0.000	-0.680
			-50	0.015	0.002	-0.001	0.920
σ_2	Benthos source rate for dissolved phosphorus (benthos source rate for dis - P)	10~20	50	0.063	0.029	-0.002	3.610
			-50	-0.039	-0.029	0.001	-2.140

Fig. 8. Calibration results of Nam River QUALKO2.

Fig. 9. Verification results of Nam River QUALKO2.

Table 12. Performance evaluation for Nam River QUALKO2 Model

Var.	Calibration		Verification	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
BOD	0.901	0.417	0.811	0.421
TN	0.788	0.016	0.834	0.019
TP	0.889	0.279	0.854	0.424
Chl- <i>a</i>	0.969	9.437	0.937	13.745

모형의 검증은 보정된 수질모형의 적정 사용여부를 판단하는 과정으로, 보정된 모형이 수질예측에 적절한지를 알아보기 위해 보정에 사용한 매개변수를 그대로 고정하고, 2008년 4월 측정된 유량·수질 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. Fig. 9에 도시한 바와 같이 BOD, TN, TP, Chl-*a* 모든 항목에서 수질모형 예측값이 실측값을 안정적으로 잘 모의하고 있다.

모형의 검·보정 결과에 대한 정확도를 평가하기 위해 통계를 이용한 오차 분석을 실시하였다. BOD, TN, TP, Chl-*a* 항목의 모형 예측 결과의 정확도에 대한 통계분석 결과 모든 항목에서 양호한 결과를 나타내었다. Chl-*a*의 RMSE 값이 다소 높은 이유는 다른 항목과 달리 단위를 $\mu\text{g/L}$ 로 설정하였기 때문이다(Table 12 참조).

정하였기 때문이다(Table 12 참조).

최종 보정 및 검증절차를 거친 남강댐 하류유역 QUALKO2 모형을 이용하여 남강댐 방류량 변화에 대한 시나리오를 설정 목표수질 달성여부를 평가하였다. 시나리오 1은 2008년부터 2012년까지의 남강댐 1월 평균 방류량인 $8.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 Head water 유량 값으로 설정하였고, 시나리오 2, 3, 4, 5는 시나리오 1의 1.5배, 2배, 2.5배, 3배씩 유량을 증가시키면서 모의(Simulation)하였다.

Fig. 10에서 보듯이 방류량이 증가할수록 남강댐 방류수에 의한 희석효과로 남강댐 하류 수역의 BOD농도가 감소하는 것으로 나타났으며, 남강D 단위유역에서는 $17.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 경우에 목표수질인 2.5 mg/L 을 만족하는 것으로 나타났고, 남강E 단위유역에서는 $21.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 경우에 목표수질인 3.1 mg/L 을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 13에서 방류량이 $8.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에서 $25.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 증가한 경우 BOD농도가 각각 13%, 13%, 9%, 6% 감소하는 것으로 나타났고, 특히 영양염류 지표인 TP, TN 보다 BOD, Chl-*a* 같은 유기 오염물이 방류량 증가에 따른 감소 정도가 높은 것으로 나타났다. 한편 시나리오별로 유량을 증가했을 때 감소하는 정도가 점차적으로 줄어들었다. 이는

Fig. 10. The simulated BOD results by water flow level along the Nam River.

Table 13. The modeling of Nam river QUALKO2 according to simulation results

Scenario	Outflow (m^3/s)	BOD (mg/L)	decrease (-)	decrease (%)	TP (mg/L)	decrease (-)	decrease (%)
①	8.6	4.5	-	-	0.117	-	-
②	12.9	3.9	0.6	13	0.109	0.008	7
③	17.2	3.4	0.5	13	0.103	0.006	6
④	21.5	3.1	0.3	9	0.098	0.005	5
⑤	25.8	2.9	0.2	6	0.094	0.004	4
Scenario	Outflow (m^3/s)	TN (mg/L)	decrease (-)	decrease (%)	Chl- <i>a</i> (mg/L)	decrease (-)	decrease (%)
①	8.6	3.228	-	-	113.8	-	-
②	12.9	2.938	0.290	9	90.9	22.9	20
③	17.2	2.742	0.196	7	75.5	15.4	17
④	21.5	2.593	0.149	5	64.5	11	15
⑤	25.8	2.476	0.117	5	55.4	9.1	14

곧 남강댐 하류 수질을 개선하기 위해 남강댐 방류량을 무한정으로 늘리는 것은 효과적이지 않은 것으로 생각된다. 하지만 남강댐 방류량이 어느 정도 양의 수준에서는 수질 개선 효과에 도움이 되는 것으로 판단된다.

이러한 연구결과로 볼 때 수문조작에 의한 유량 조절은 연중 특정시기에 편중된 강우량으로 유량변동이 매우 큰 우리나라 강우 특성상 한계가 있으며, 남강댐 하류 수역의 영양염류 농도가 식물플랑크톤 증식의 제한인자로 작용하지 않을 만큼 높다는 점과 식물플랑크톤에 의한 내부 유기물 생산이 하류 수역의 유기물 오염의 주요 기원으로 나타난 것을 감안할 때 근본적으로 식물플랑크톤 증식을 제어하기 위한 영양염류 저감 대책을 장기적으로 마련해야 할 것으로 판단된다.

4. Conclusion

낙동강수계에 유입되는 지천 중에 가장 큰 오염원을 배출하는 남강댐 하류유역 수질개선을 위해 1차적으로 중점 관리 대상지류 선정 연구(Jung et al., 2013)를 통해 수질관리 필요 지류들을 조사하여 선정하였고, 후속 연구로 남강댐 하류유역 분류구간을 대상으로 식물플랑크톤 증식에 의한 수중유기물 기여도를 통계분석을 통해 평가하고, 아울러 수질예측의 정확도를 통계적으로 평가하는 것과 보정과 검정을 거친 QUALKO2 모형을 이용하여 향후 남강 하류 구간에서 빈번히 발생하는 부영양현상을 남강댐 방류량 증가 시나리오를 통한 수질예측으로 최적의 수질관리 방안을 분석한 결과 다음과 같은 주요한 연구 성과를 얻을 수 있었다.

- 1) 강우량 분석결과 총강우량의 약 60~70%가 우기인 6월~9월에 집중되고, 그 외 월은 평균강우량 이하의 강우가 내리는 것으로 분석되었다. 총강우량이 많으면 수질이 개선되고, 적으면 수질이 악화되는 양상을 나타내지만, 우기에 집중되는 것보다는 상대적으로 월별로 균등한 양이 일정하게 내리는 것이 수질관리에 유리할 것으로 판단된다. 강우는 자연현상으로 인위적 제어가 불가능한 사상이므로 남강댐 하류유역 수질개선을 위해서는 강우량이 상대적으로 부족한 기간의 댐(분류) 방류량 증가가 효과적일 것으로 판단된다.
- 2) 남강댐은 남강분류와 사천만방수로를 통하여 방류하고 있다. 이중 남강하류 수질개선은 남강댐 분류방류량과 관련이 있다. 남강댐 분류 방류량은 발전방류량과 여수로 방류량의 합이다. 이중 발전방류량의 평균은 915.0 백만톤(29.0 m³/s)으로 농업용수와 하천유지용수 연간 계획 공급량 348.9 백만톤(11.1 m³/s)을 훨씬 넘는 것으로 나타났다. 하지만 월별 방류량을 살펴보면 위 계획공급량 이하의 월이 1월~4월과 10월~12월에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 여수로 방류는 주로 비가 많이 내리는 우기(6월~9월)에 이루어지기 때문에 그 외 월의 방류량은 모두 발전방류량에 해당하는 것으로 남강하류 수질개선을 위해서는 발전방류량의 증가가 필요할 것으로 판단된다.

- 3) 남강댐 직하류인 남강C(남강)의 수질은 2008년~2012년까지 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나, 남강댐 하류 수질측정망 지점에서의 최근 5년간 연평균 분포를 보면 남강 하류로 갈수록 BOD, TP, TN, Chl-*a*의 농도가 높아지는 것을 알 수가 있다. 특히, Chl-*a*의 경우 단위유역 남강D(남강2A)지점을 지나면서 급격히 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 남강D(남강2A)와 남강 말단 조사지점인 남강E(남강4-1) 월평균 BOD값을 살펴본 결과 1월~5월까지 높은 BOD 값을 보여 봄철 유기물 오염도가 높은 것으로 나타났다.
- 4) 구간별로 수질항목간의 상관관계를 분석한 결과 경사가 완만해져 유속이 느려지기 시작하는 전이대 구간인 중류와 하류 구간에서 BOD와 Chl-*a* 농도간의 상관관계가 높게 나타나 이 구간에서 조류증식에 의한 물질대사 요인인 Chl-*a* 즉 내부 유기물 생산량이 이 수역의 유기물 오염의 주요기원으로 추정되며, 영양염류는 전 구간에서 부영양화 기준을 초과하여 남강 하류 수역에서 식물플랑크톤 증식에 제한 요인은 아닌 것으로 조사되었다. 이 외에도 식물플랑크톤 증식에 주요한 영향을 미치는 인자로는 유속과 직접적으로 관련이 있는 강우사상과 남강댐 방류량 그리고 그에 따른 수리학적 체류시간으로 나타났다. 또한 각 구간의 수질요인을 분석한 결과 중·하류구간에서 BOD, COD_{Mn}, Chl-*a* 농도간의 높은 양의 인자 부하량을 보여 남강 수역의 유기물 오염관리를 위해서는 수중에서 식물플랑크톤의 증식을 제어하는 것이 매우 중요한 것으로 조사되었다.
- 5) QUALKO2 모형을 이용하여 댐 방류량 변화에 따른 남강 하류 지역의 BOD 수질개선을 위한 필요유량 산정 결과 남강D(남강2A) 지점은 남강댐 방류량이 17.2 m³/sec 이상의 경우 목표수질인 2.5 mg/L을 만족하는 것으로 나타났고, 남강E(남강4-1) 지점은 21.5 m³/sec이상의 경우 목표수질인 3.1 mg/L을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 남강 하류의 수질개선을 위한 최대 방류량은 21.5 m³/sec 이상이 꾸준히 방류되어야 수질개선 효과가 있는 것으로 분석되었다.
- 6) 남강댐에서 공급 가능한 최대 물공급량은 기본계획상으로는 64.4 m³/s이고, 최근 5년간의 유입량 분석결과 73.5 m³/s (25.2~106.2 m³/s)까지 공급할 수 있는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과로 볼 때 추가적인 댐 방류량 확보에 충분한 여력이 있는 것으로 판단되며, 남강댐 하류유역 수질개선을 위해 댐 방류량 증가가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Bernard, P., Antoinc, L., and Bernard, L. (2004). Principal Component Analysis: an Appropriate Tool for Water Quality Evaluation and Management-application to a Tropical Lake System, *Ecological Modeling*, 178, pp. 295-311.
- Choi, J. K., Chung, S. W., and Ryoo, J. I. (2008). Comparative Evaluation of QUAL2E and QUAL-NIER Models for Water

- Quality Prediction in Eutrophic River, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(1), pp. 54-62. [Korean Literature]
- Fallon, R. D. and Thomas, D. B. (1979). Decomposition of Blue-Green Algae (cyanobacterial) Blooms in Lake Mentota, Wentota, Wisconsin, *Applied and Environment Microbiology*, 37(5), pp. 820-820.
- Forsberg, C. and Ryding S. O. (1980). Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste lakes, *Archiv fur Hydrobiologic* 89, pp. 189-207.
- Gyeongnam Development Institute. (GNDI). (2010). *A Plan of Quality Improvement in Lower Watershed of Nam River Dam*, Gyeongnam Development Institute, pp. 1-100. [Korean Literature]
- GyeongSangNamDo. (2009). *A 2th Basic Plan of TMDL in GyeongSangNamDo*, GyeongSangNamDo, pp. 6-1-6-4. [Korean Literature]
- Jeong, S. S. (2010). *The Correlation and Trophics State of Water quality in the Downstreams Water System of Nam River*, Master's Thesis, Graduate School Jinju National University, pp. 62-68. [Korean Literature]
- Jung, K. Y. (2009). *Advanced Control Strategieso Water Quality Management in Nakdong River*, Master's Thesis, Kyungpook National University, pp. 70-93. [Korean Literature]
- Jung, K. Y., Kim, G. H., Lee, J. W., Lee, I. J., Yoon, J. S., Lee, K. L., and Im, T. H. (2013). Selection of Priority Management Target Tributary for Effective Watershed Management in Nam-River Mid-watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(4), pp. 514-522. [Korean Literature]
- Kim, E. S., Sim, K. B., Kim, S. D., and Choi, H. I. (2012). Water Quality Assessment for Reservoirs using the Korean Trophic State Index, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(1), pp. 78-83. [Korean Literature]
- Kim, J. G. and Lee, J. Y. (2001a). Application of QUAL2E Model for Water Quality Management in the Keum River(I) - Estimation of Model Input Parameter and Autochthonous BOD -, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 10(2), pp. 119-127. [Korean Literature]
- Kim, J. G. and Lee, J. Y. (2001b). Application of QUAL2E Model for Water Quality Management in the Keum River(II) - Waste Loads Allocation Analysis by Considering Autochthonous BOD -, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 10(1), pp. 21-25. [Korean Literature]
- Kim, S. K., Views & News. (2012). <http://www.viesnnews.com/article/view.jsp;seq=89691>.
- 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), pp. 161-168. [Korean Literature]
- Kim, O. S. (2005). *A Study on the Application of Total Maximum Daily Loads Management in Lower Watershed of Nam River*, Doctoral Thesis, Gyeongsang National University, pp. 90-158. [Korean Literature]
- Han River Environment Research Center (HRERC). (2007). <http://www.nier.go.kr/eric/portal/han/pf/hnrv-pf-04.page>.
- Kwon, N. Y. (2009). *Development of Water Quality Model for Application of TMDL*, Master's Thesis, Kyungpook National University, pp. 17-41. [Korean Literature]
- Nakdong River Environment Research Center(NRERC). (2009). *'08 Management Report of Target Water Quality Monitoring System in Nakdong River Basin*, Nakdong River Environment Research Center, pp. 142-163. [Korean Literature]
- National Water Resources Management Integrated Information System (NWRMIIS). (2013). <http://www.wamis.go.kr/>.
- Park, J. H., Lee, J. K., Oh, S. Y., and Rhew, D. H. (2013). Necessity for Expansion of Total Phosphorus Management in the Geum River Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(3), pp. 400-408. [Korean Literature]
- Shin, C. M. (2009). *Applicability Evaluation of Parameters of River Water Quality Model for TMDL Planning*, Doctoral Thesis, University of Seoul, pp. 9-173. [Korean Literature]
- Shin, S. K., Park, C. K., and Song, K. O. (1997). Evaluation of Water Quality using Principal Component Analysis in the Nakdong River Estuary, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 7(2), pp. 171-176. [Korean Literature]
- Sohn, E. R., Park, J. I., Lee, B. R., Lee, J. W., and Kim, J. S. (2013). Winter Algal Bloom and Spatial Characteristics of Water Quality in the Lower Taewha River, Ulsan, Korea, *Korean Journal of Microbiology*, 49(1), pp. 30-37. [Korean Literature]
- Yoo, H. S. (2002). Statistical Analysis of Factors Affecting the Han River Water Quality, *Journal of Korean Society on Environment Engineering*, 24(12), pp. 2139-2150. [Korean Literature]
- Yu, J. J., Shin, S. H., Yoon, Y. S., and Kang, D. K. (2012). Water Quality Prediction and Forecast of Pollution Source in Nangang Mid-watershed each Reduction Scenario, *Environmental Impact Assessment*, 21(4), pp. 543-552. [Korean Literature]