

## LOADEST 모형을 활용한 수질 경향성 분석: 영산강 수계를 중심으로

이기순<sup>a</sup> · 백종훈<sup>b</sup> · 최지연<sup>c</sup> · 이영재<sup>d</sup> · 신동석<sup>e</sup> · 하돈우<sup>f,†</sup>

국립환경과학원 영산강물환경연구소

## Analysis of Water Quality Trends Using the LOADEST Model: Focusing on the Youngsan River Basin

Gi-Soon Lee<sup>a</sup> · Jonghun Baek<sup>b</sup> · Ji Yeon Choi<sup>c</sup> · Youngjea Lee<sup>d</sup> · Dong Seok Shin<sup>e</sup> · Don-Woo Ha<sup>f,†</sup>

Dept. of Yeongsanriver Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research  
(Received 10 August 2022, Revised 18 October 2022, Accepted 16 November 2022)

### Abstract

In this study, long-term measurement data were applied to the LOADEST model and used as an analysis tool to identify and interpret trends in pollution load. The LOADEST model is a regression equation-based pollution load estimation program developed by the United States Geological Survey (USGS) to estimate the change in the pollution load of rivers according to flow rate and time and provides 11 regression equations for pollution load evaluation. As a result of simulating the Gwangjuchen2, Pungyeongjeongchen, and Pyeongdongchen in the Yeongbon B unit basin in the middle and upper reaches of the Yeongsan River with the LOADEST model using water quality and flow measurement data, lower values were observed for the Gwangjuchen2 and Pyeongdongchen, whereas the Pungyeongjeongchen had higher values. This was judged to be due to the characteristics of the LOADEST model related to data continuity. According to the parameters estimated by the LOADEST model, pollutant trends were affected by increases in the flow. In addition, variability increased with time, and BOD and T-P were affected by the season. Thus, the LOADEST model can contribute to water quality management as an analytical tool for long-term data monitoring.

**Key words** : LOADEST, Pollutant loads, Regression model, Youngsan river

<sup>a</sup> 전문위원(Committee of Special Talent), bugur2@naver.com, <https://orcid.org/0000-0002-2260-8127>

<sup>b</sup> 전문위원(Committee of Special Talent), bjh39470@naver.com, <https://orcid.org/0000-0001-5941-568X>

<sup>c</sup> 연구사(Environment Research Laboratory), yeonJichoi@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0001-9534-5690>

<sup>d</sup> 연구관(director and research official), nier@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0003-3274-2001>

<sup>e</sup> 소장(organization chief and research official), sds8488@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0001-5636-1460>

<sup>f</sup> Corresponding author, 전문위원(Committee of Special Talent), hahaha9909@naver.com, <https://orcid.org/0000-0001-5395-4826>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. Introduction

공공수역의 수질개선과 수생태계 건강성 회복을 위해 정부에서는 다양한 제도를 도입하여 시행함에 따라 측정망을 운영하여 관리하고 있다. 관측자료를 활용한 하천의 오염물질의 변화 및 수질·유량의 변화에 따른 경향성 파악은 매우 중요하다.

수질변동 요인에는 인위적인 요인과 자연적인 요인이 있다. 자연적인 요인에는 강우량, 수온, 조류(Algae)의 발생, 생태환경 및 경작패턴의 변화 등 매우 다양하며 그 정도도 매우 크게 나타나고 있다. 그러나 자연의 변화는 일정한 패턴으로 전개되지 않으며 수질의 영향도 일정하게 나타나지 않으므로 이들의 영향을 정량화하여 제거하기란 쉽지 않다(Yu et al., 2010). 하천의 수질은 수리·수문학적 특성, 퇴적물의 오염상태, 유역의 기후, 기상, 지질 등 자연환경의 복합적인 상호작용과 인위적 환경 등에 의해 다양하게 변화하기 때문에 수질의 정확한 변동 특성을 파악하거나 수질을 평가하는데, 많은 어려움이 따른다 (Ahn et al., 2016). 유역내 효과적인 하천수질 및 환경을 정량·정성적으로 평가하기 위해서는 수계로 유입되는 영향유역내의 오염원에 대한 구체적이고 정확한 자료의 확보가 뒷받침되어야 한다(Han et al., 2014). 관측된 수질 자료는 일반적으로 정규분포 형태를 가지기보다 비정규분포 형태를 가지는 경우가 많아 통계적인 분석 및 수질 예측 모델 등의 해석에 어려움이 따른다. 하지만 수질 관리계획 등에 반영할 수 있도록 수질을 해석하여 제시하는 것이 필요하다. Choi et al. (2017)은 한강수계의 수질오염총량 측정망 유량·수질 자료를 활용하여 비모수적 통계방법으로 단위유역별 수질측정항목 변화의 경향성 및 기타 수질특성을 분석하였으며, Choi et al. (2021)은 가축분뇨 해양투기 금지 전후 한강수계의 수질변동 경향성을 Mann-Kendall test, Seasonal Mann-Kendall test, Locally Weighted Scatterplot Smoothing (LOWESS)과 같은 방법으로 경향성 분석과 상관 분석을 수행하였다. 현재 수질 평가 방법 중 연간 산술평균값은 수문학적 요소에 의한 유량의 변화에 따라 연도별 등락 폭이 크게 영

향을 받는다는 문제가 발생한다. 환경부 측정망 자료를 평가할 때 LOADEST를 활용하여 수질 경향성 분석을 통해 수질 항목별 평가가 가능하다. 이에 유량 변화 영향을 배제한 수질 증·감 상황 파악 가능하여 수질개선 여부 평가에 합리적인 방법으로 적용되고 있다. 연구사례로는 유역 내 하천의 수질오염 분석에 있어 중요한 오염부하량의 산정하고자 Park (2014)은 LOADEST를 활용하여 오염부하량을 예측하는 회귀식에 의한 예측치와 실측치를 비교하여, 회귀식을 이용한 일부하량 산정 방법을 분석하였다. Shin et al. (2009)은 비점오염부하 산정을 LOADEST로 적용성을 평가하였으며, Kim et al. (2017)은 낙동강 수계를 중심으로 머신러닝 기법을 활용하여 유황별 LOADEST의 적정 회귀식 선정을 연구하였다. 유역의 지속 가능한 수질을 관리하기 위해서는 장기간에 걸친 수질의 동향을 이해하고 접근하는 것은 필수적이며 다양한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 영산강 수계 지류·지천에 대한 축적된 자료를 활용하여 오염부하량의 경향성을 파악 및 해석하여 해당 유역의 효과적이고 지속 가능한 관리를 위한 기초자료 제공을 목적으로 하고자 한다.

### 2. Material and Method

#### 2.1 Study Area

본 연구의 대상지역은 광주천2, 풍영정천, 평동천으로 영산강 상류 중권역이며 수질오염총량제 영본B 단위유역에 위치하고 있다. 광주천2는 도심지역을 관통하며, 풍영정천은 하남산단을 지나서 말단에 영산강에 합류한다. 평동천은 광주광역시 외곽의 영농활동의 비중 높은 하천으로 총량측정망 및 수질예보계 측정망이 운영되어 약 8일 간격으로 유량 및 수질을 동시 측정하고 있다. 연구 기간은 '16~'20년 운영자료를 바탕으로 수질 및 유량 현황을 분석한 자료로 LOADEST로 분석하였다. Fig. 1은 총량측정망 단위유역과 측정지점을 나타낸 것이다.

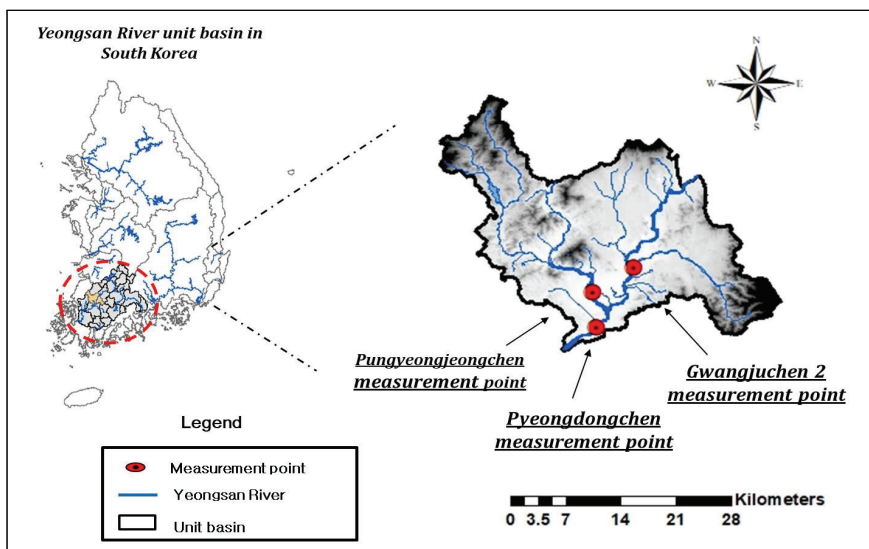


Fig. 1. Location of the research object measurement points.

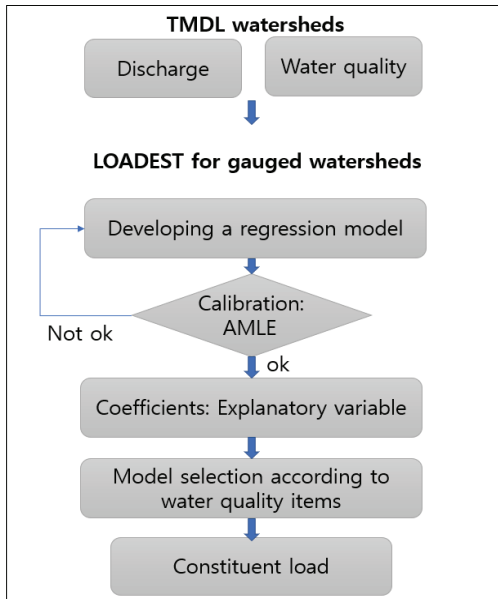


Fig. 2. Schematic diagram of this study.

2.2 LOADEST Model

대상지점의 장기적인 부하량 변동 특성을 평가하기 위하여 미국 USGS에서 개발한 회귀식 기반 LOADEST을 사용하였다(Runkel et al., 2004). LOADEST은 유량과 시간에 따라 변화하는 하천의 오염부하를 산정하기 위해 개발된 회귀식 기반 오염부하산정 프로그램이며 오염부하량 평가를 위해 11가지 회귀식을 제공한다.

본 연구에서는 Cohn, Caulder et al. (1992)에 의해 개발된 다변수 로그선형모델을 사용하였다. LOADEST 회귀식 중 9번 회귀식은 식(1)에서 보는 바와 같이 총 7개의 매개변수가 적용되며, 회귀식 중에 가장 많은 매개변수로 유량과 연중 환산시간, 계절적 특성을 고려하는 회귀식이다. 이 중 회귀계수  $\alpha_1 \sim \alpha_2$ (유량 회귀계수),  $\alpha_3 \sim \alpha_4$ (시간 회귀계수),  $\alpha_5 \sim \alpha_6$ (계절변화 회귀계수)로 이를 통계적 유의성을 바탕으로 영향력을 분석하였다.

따라서, 매개변수 계수를 통해 오염부하의 유량 의존성, 시간적 증감 경향, 계절성을 평가할 수 있다.

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime) + a_5 dtime + a_6 dtime^2 \quad \text{식(1)}$$

여기서,

y는 오염부하량, lnQ는 유량 로그값에서 이들 값의 중앙값

(center)을 뺀 값.

$dtime = (T - \bar{T})$ 으로 연중 시간을 0~1의 소수로 환산한 값에서 이들 값의 중앙값(center)을 뺀 값.

$T =$  시간(year),  $\bar{T} =$  중심변수(Centering Variables)

식(2)와 식(3)에서 N은 교정 데이터 세트의 관측치 수이며,  $\bar{T}$ 는 데이터의 평균, 중심에 배치할 수량이고, LOADEST 내에서는 T를 뺀 결과를 “중앙”값을 사용하여 선형(소수 시간, 로그 흐름) 및 2차(소수 시간 제곱, 로그 흐름 제곱) 설명 변수를 개발하는 데 사용한다.  $\alpha_0 \sim \alpha_6$ 은 회귀계수이고 중앙값(center) 계산 방법은 Cohn, Caulder et al. (1992)에 상세히 제시되어 있다.

$$\bar{T} = \bar{T} + \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^3}{2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad \text{식(2)}$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad \text{식(3)}$$

회귀모델에 의해 모의 된 부하량을 평가하는 방법으로는 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent BIAS (PBIAS), Root mean Square error-observation standard deviation Ratio (RSR)를 사용하였으며, 각 통계적 변량에 대한 적합성 평가 기준은 Moriasi et al. (2007)가 제안한 월단위 자료 기반 4단계 기준을 적용하였다(Table 2).

3. Results and Discussion

3.1 수질, 유량, 오염부하량 특성

본 연구대상인 측정망 지점의 '16~'20년 운영자료를 바탕으로 수질 및 유량 현황을 분석하였다.

'16년~'20년 광주천2 평균 유량은 1.404 m<sup>3</sup>/s, 최대 유량은 17.339 m<sup>3</sup>/s('18년)이며, 최소 유량은 0.077 m<sup>3</sup>/s('20년)로 산정되었다. BOD 및 T-P는 각 0.9~14.5 mg/L, 0.046~0.982 mg/L로 분석되었다.

풍영정천 평균 유량은 1.452 m<sup>3</sup>/s이며, 최대 유량은 40.627 m<sup>3</sup>/s('18년), 최소 유량은 0.130 m<sup>3</sup>/s('19년)로 산정되었다. BOD 및 T-P의 범위는 각 1.0~9.8mg/L, 0.041~0.408 mg/L로 나타났다.

평동천의 유량 범위(평균)는 0.040 m<sup>3</sup>/s~ 8.341 m<sup>3</sup>/s(0.558 m<sup>3</sup>/s) 이고, BOD 및 T-P의 범위는 각 1.3~13.4 mg/L, 0.100~0.883 mg/L로 나타났다. (Table 3, Fig. 3~5) Fig. 3~5는 관측자료의 월평균을 나타낸 것이다.

Table 2. General performance ratings for the recommended statistics (Moriasi et al., 2007)

Performance Rating	NSE			PBIAS(%)			RSR		
Very good	0.75<	NSE	≤ 1.0		PBIAS	<± 10	0.00<	RSR	≤ 0.5
good	0.65<	NSE	≤ 0.75	± 10 ≤	PBIAS	<± 15	0.50<	RSR	≤ 0.6
Satisfactory	0.50<	NSE	≤ 0.65	± 15 ≤	PBIAS	<± 25	0.60<	RSR	≤ 0.7
Unsatisfactory		NSE	≤ 0.50		PBIAS	>± 25		RSR	> 0.7

Table 3. Annual average BOD, T-P, and flow rate by measurement point

Unit basin	Item		'16	'17	'18	'19	'20	Ave. (’16~’20)
Gwangju- chen2	BOD (mg/L)	Min.	0.900	1.200	1.500	1.000	1.700	4.355
		Max.	14.500	8.800	12.200	10.700	9.100	
		Ave.	3.488	4.859	4.532	4.424	4.595	
	T-P (mg/L)	Min.	0.049	0.046	0.057	0.048	0.082	0.149
		Max.	0.982	0.757	0.535	0.718	0.310	
		Ave.	0.128	0.136	0.162	0.171	0.153	
	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Min.	0.543	0.289	0.370	0.632	0.077	1.404
		Max.	7.141	7.670	17.339	3.722	6.222	
		Ave.	1.569	1.145	1.812	1.119	1.341	
Pung - yeong - jeung - chen	BOD (mg/L)	Min.	1.000	1.300	1.400	1.100	1.300	3.341
		Max.	6.200	9.800	7.400	7.800	7.900	
		Ave.	2.642	3.953	3.005	3.344	3.838	
	T-P (mg/L)	Min.	0.047	0.041	0.073	0.049	0.076	0.127
		Max.	0.278	0.343	0.408	0.325	0.279	
		Ave.	0.110	0.114	0.136	0.136	0.142	
	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Min.	0.472	0.326	0.239	0.130	0.307	1.452
		Max.	7.089	25.468	40.627	2.243	4.223	
		Ave.	1.421	1.950	2.020	0.882	0.939	
Pyeong - dong - chen	BOD (mg/L)	Min.	1.400	1.700	1.500	1.300	1.600	3.456
		Max.	8.000	8.000	7.900	8.200	13.400	
		Ave.	3.720	3.593	3.091	3.309	3.580	
	T-P (mg/L)	Min.	0.100	0.111	0.112	0.102	0.117	0.241
		Max.	0.306	0.883	0.524	0.473	0.801	
		Ave.	0.192	0.264	0.231	0.261	0.262	
	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Min.	0.102	0.040	0.097	0.068	0.051	0.558
		Max.	2.850	8.341	5.060	2.064	2.016	
		Ave.	0.601	0.692	0.730	0.387	0.356	

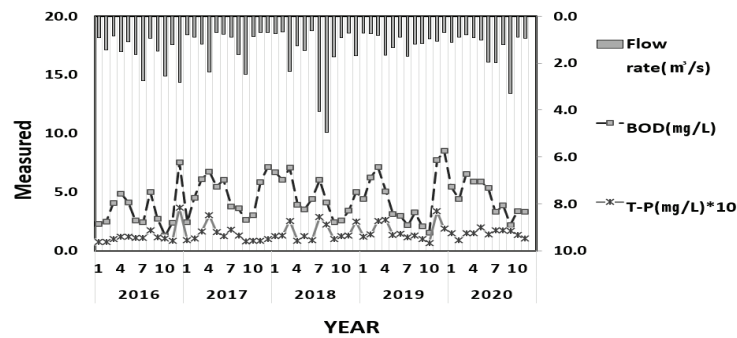


Fig. 3. Measurement data on the flow rate and water quality at the Gwangju-chen2 point.

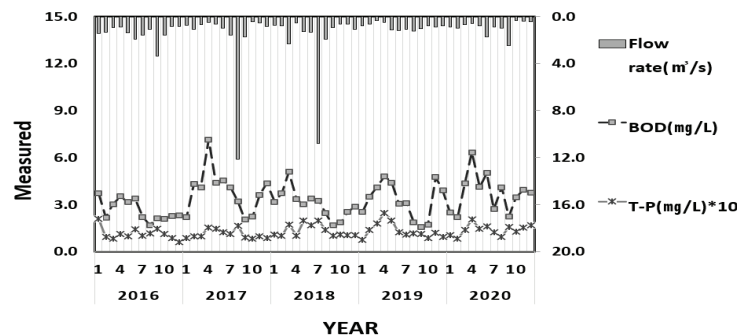


Fig. 4. Measurement data on the flow rate and water quality at the Pungyeongjeongchen point.

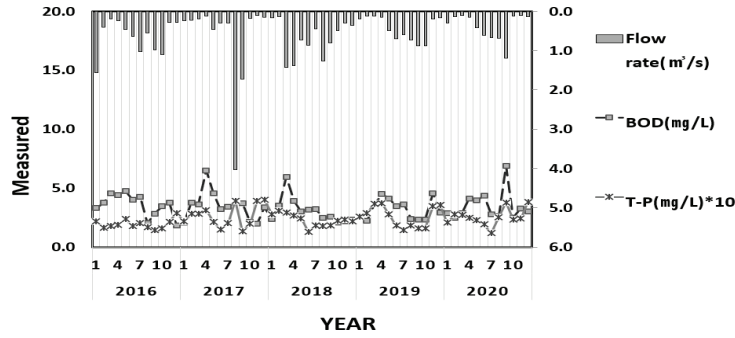


Fig. 5. Measurement data on the flow rate and water quality at the Pyeongdongchen point.

Table 4. Annual average of the delivery pollutant loads (BOD, T-P) at the measurement point

Unit basin	Item		'16	'17	'18	'19	'20
Gwangju- chen2	BOD (kg/d)	Min.	104.509	112.285	100.310	115.551	27.942
		Max.	4935.859	2929.867	8496.230	1563.296	1505.226
		Ave.	487.541	457.739	735.532	399.152	463.313
	T-P (kg/d)	Min.	3.309	2.772	3.310	3.210	1.344
		Max.	222.378	118.056	696.612	126.118	85.475
		Ave.	20.515	13.981	48.258	17.678	17.237
Pung - yeong - jeong - chen	BOD (kg/d)	Min.	53.015	56.333	46.449	55.037	84.879
		Max.	1959.967	9241.828	15444.760	1134.251	1167.575
		Ave.	354.740	721.606	675.817	260.193	291.982
	T-P (kg/d)	Min.	3.750	1.436	2.808	1.626	3.342
		Max.	120.660	754.749	1432.151	62.983	80.636
		Ave.	15.981	33.897	48.104	10.837	12.176
Pyeong - dong - chen	BOD (kg/d)	Min.	25.574	5.875	20.390	13.928	14.463
		Max.	1034.208	3315.047	3147.725	517.156	2334.044
		Ave.	195.835	260.732	254.794	113.191	152.069
	T-P (kg/d)	Min.	1.066	0.719	2.274	1.765	0.788
		Max.	69.440	636.345	208.974	29.100	38.668
		Ave.	10.097	25.605	17.429	7.369	7.294

Table 4는 오염총량제 3단계('16~'20년) 동안 관측된 수질(BOD, T-P) 및 유량 자료를 활용하여 유달부하량을 나타낸 것으로 광주천2 BOD 부하량은 27.942 kg/d(최소,'20)~8496.230 kg/d(최대,'18), T-P 1.344 kg/d(최소,'20)~696.612 kg/d(최대,'18)로 산정되었다. 풍영정천 BOD, T-P의 유달부하량은'18년,'17년에 최소,'18년에 최대값으로 분석되었으며, BOD는 46.449 kg/d~15444.760 kg/d, T-P 1.436 kg/d~1432.151 kg/d로 산정되었다. 평동천 BOD 부하량은 5.875 kg/d(최소,'17)~3315.047 kg/d(최대,'17), T-P 0.719 kg/d(최소,'17)~636.345 kg/d(최대,'17)로 산정되었다.

3.2 모델의 평가방법

회귀모델에 의해 모의된 부하량을 평가하는 방법으로는 NSE, PBIAS, RSR를 사용하였다. 본 연구에서도 통계적 변량에 대한 모델의 적합성은 Moriasi et al. (2007)이 제안한 월 단위 모의에 대한 기준과 동일하게 적용하였다. Moriasi et al. (2007)은 유역 유출모형별 성능평가를 위해 월단위 관측자료와 모델의 모의 결과를 토대로 통계기법을 적용하나

낮은 통계적 변량에서도 모의치를 적용하여 평가하였다. 모델에 의한 관측값과 계산값이 정량적인 신뢰성 평가를 위해서는 주로 평가지수가 이용되며 평가는 4단계인 매우 좋음(very good), 좋음(good), 충분함(satisfactory), 불충분함(unsatisfactory)으로 구분하여 평가하였다(Table 5~7). 부하량을 평가하는 방법 NSE, PBIAS, RSR은 식(4)~식(6)와 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \tag{4}$$

$$PBIAS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2 \times 100}{\sum Q_{obs}} \tag{5}$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV} = 1 - \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}} \tag{6}$$

여기서,  $Q_{obs}$ , 관측자료,  $Q_{cal}$ , 예측자료,  $\overline{Q_{obs}}$ , 관측자료의 평균값



**Table 5.** Evaluation according to the general performance rating for the recommended statistics of Gwangjuchen2

Item	NSE		PBIAS(%)		RSR	
BOD	0.77	Very good	3.35	Very good	0.63	good
T-P	0.90	Very good	4.76	Very good	0.36	Very good

**Table 6.** Evaluation according to the general performance rating for the recommended statistics of Pungyeongjeongchen

Item	NSE		PBIAS(%)		RSR	
BOD	0.58	Satisfactory	-10.40	good	0.42	Very good
T-P	0.79	Very good	-15.88	Satisfactory	0.32	Very good

**Table 7.** Evaluation according to the general performance rating for the recommended statistics of Pyeongdongchen

Item	NSE		PBIAS(%)		RSR	
BOD	0.90	Very good	2.00	Very good	0.35	Very good
T-P	0.68	good	11.21	good	1.01	Unsatisfactory

광주천2 BOD 및 T-P의 적합성 등급은 대부분 매우 좋음 (very good) 등급으로 평가되어 LOADEST에 의해 산정된

계산값의 신뢰성은 높은 것으로 나타났다(Table 5).

풍영정천 BOD 등급은 만족(satisfactory)과 좋음(very good), T-P 등급은 매우 좋음(very good), 만족(satisfactory)으로 평가되었다(Table 6).

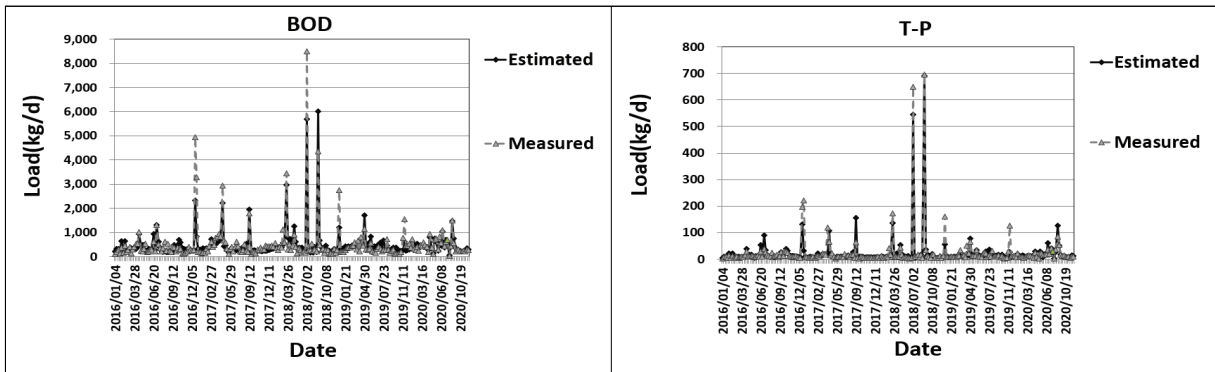
평동천의 평가 등급은 대부분 좋음(good)등급 이상으로 평가되어 신뢰성이 높은 것으로 나타났다(Table 7).

Moriasi et al. (2007)에 따르면 월 단위 유출량 자료의 모의 시 NSE가 0.50 이상, RSR이 0.70 이하일 때, 결과가 만족스럽다고 보고한 바 있으며, Moriasi et al. (2007)은 일반적으로 모델의 모의 결과는 시간 간격이 짧을수록 모의치의 통계적 변량이 낮게 나타난다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 분석한 모델의 모의 결과는 광주천2과 평동천의 부하량은 실측치에 비해 낮은 통계적 변량으로 분석되었으며, 풍영정천은 실측치에 비해 높은 통계적 변량으로 분석되었다. 이는 풍영정천은 관측된 부하량의 편차에 따른 모의 결과로 판단된다(Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8).

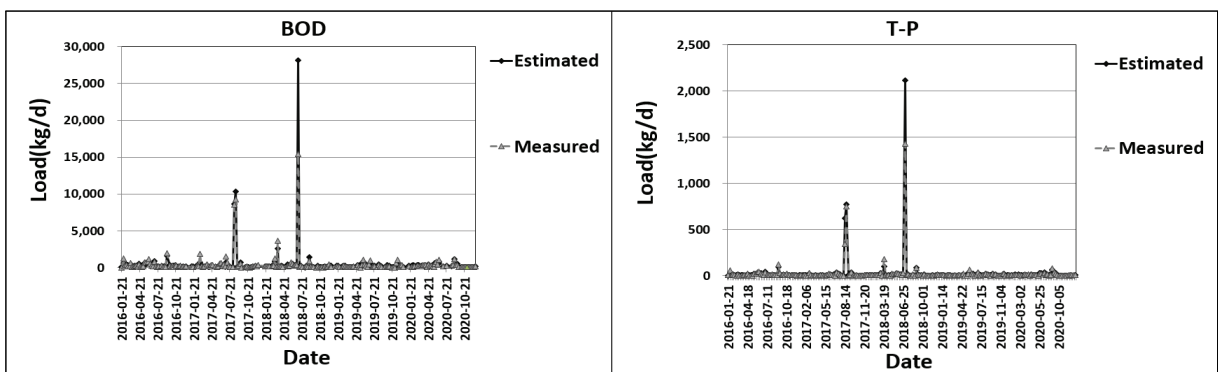
회귀모델은 관측값을 비교적 잘 반영하고 있는 것으로 분석되었으며 부하량 관측값은 계산값과 산포도로 나타내어 비교한 결과, 실측치에 비해 낮은 통계적 변량으로 나타났으나 오염부하 모의와 경향성 파악 등에는 적합한 것으로 판단되었다(Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11).

### 3.3 LOADEST Model의 회귀식 분석

Adjusted Maximum Likelihood Estimation (AMLE)방법에 적용된 회귀식의 매개변수를 분석하여 본 연구의 대상지점의 BOD 와 T-P의 경향성 분석을 하였다.



**Fig. 6.** Comparison of the calculated BOD, T-P load, and LOADEST load for Gwangjuchen2.



**Fig. 7.** Comparison of the calculated BOD, T-P load, and LOADEST load for Pungyeongjeongchen.

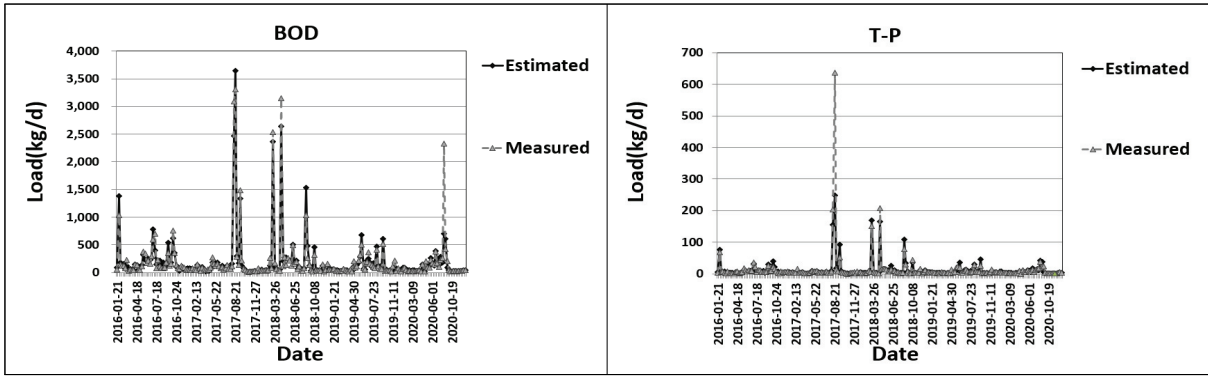


Fig. 8. Comparison of the calculated BOD, T-P load, and LOADEST load for Pyeongdongchen.

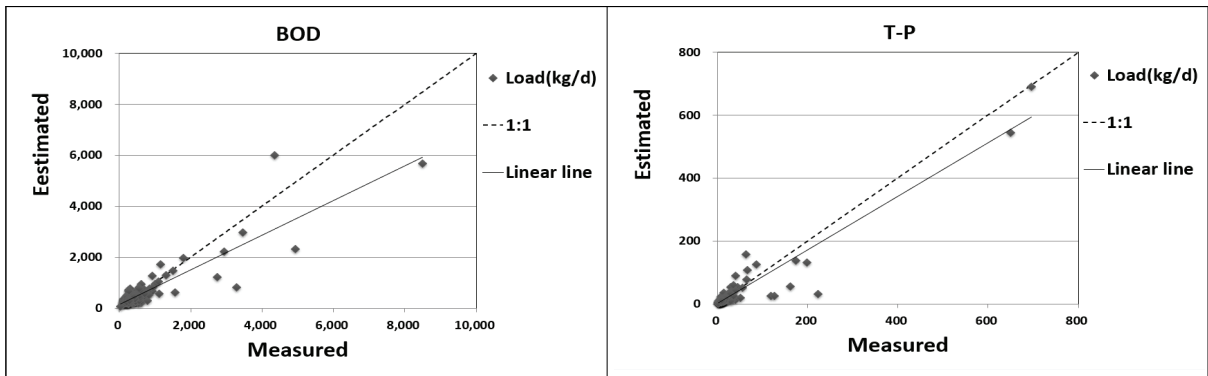


Fig. 9. Comparison of the water quality item load and maximum load calculated for Gwangjuchen2.

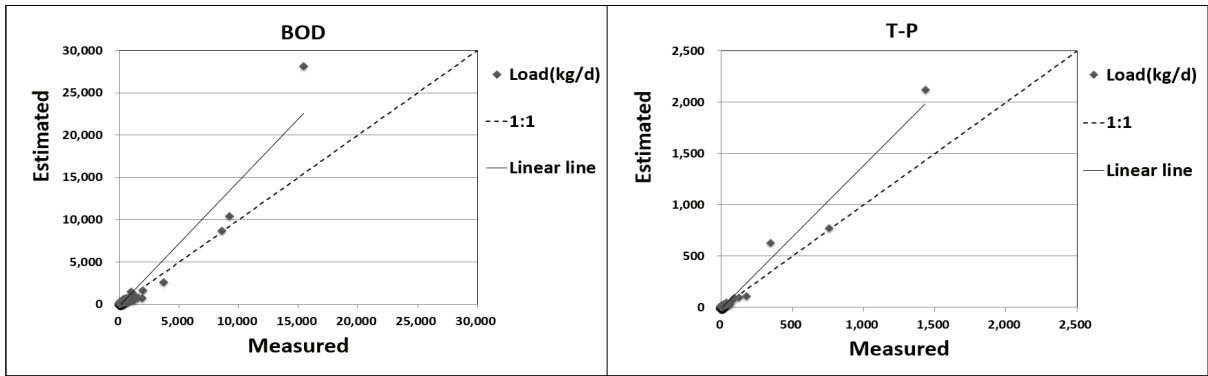


Fig. 10. Comparison of the water quality item load and maximum load calculated for Pungyeongjeongchen.

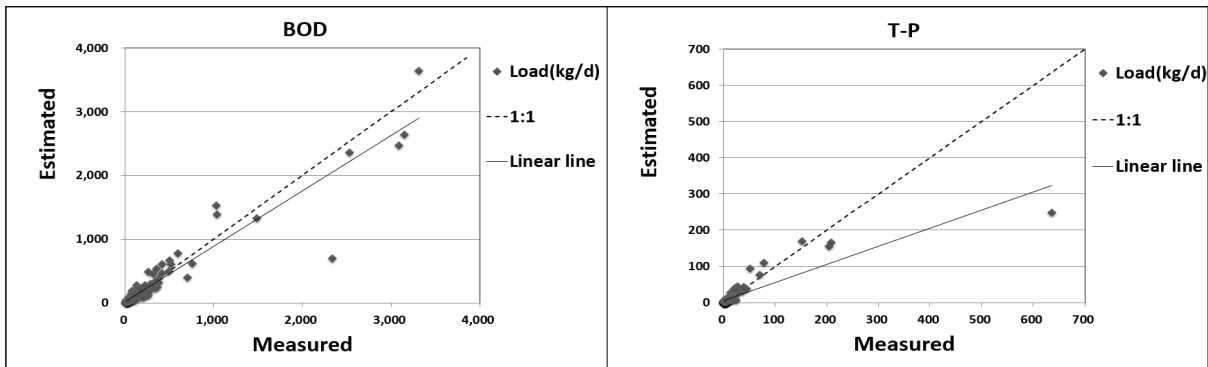


Fig. 11. Comparison of the water quality item load and maximum load calculated for Pyeongdongchen.

LOADEST 모델은 회귀식의 매개변수를 산정하는데 있어 Maximum Likelihood Estimation (MLE), Least Absolute Deviation (LAD), AMLE방법을 사용한다. MLE와 AMLE 방법은 보정된 모델의 잔차가 정규분포를 따를 때 사용하는 방법이며, LAD 방법은 그렇지 않을 경우, 사용한다. 또한, MLE와 AMLE는 모델의 보정에 사용된 유량 또는 수질자료의 이상치 수정여부에 따라 분류된다. 수정이 이루어진 경우 AMLE를 사용하며 그렇지 않은 경우 MLE 방법을 사용한다 (Cohn, Gilroy et al., 1992).

3.3.1 광주천2 경향성 분석

부하량 변동 파악에 적합한 것으로 판단된 LOADEST의 회귀계수를 Table 8에 나타내었다.

유의수준(P)은 검정 결과 p의 값이 0.01 (1% 유의수준)보다 작으면 매우 유의, 0.01과 0.1사이 (1~10% 유의수준)에 있으면 보통 유의 그리고 0.1 (10% 유의수준)보다 크면 유의하지 않은 것으로 판정하였다(Helsel and Hirsch, 2002; Na and Park 2003).

광주천2 BOD의 유량 의존성을 나타내는 회귀계수,  $\alpha_1$ 은 통계적으로 유의하고, 변수가 양의 값으로 분석되어 유량 증가에 따른 부하량도 증가하는 것으로 나타났다.

시간 회귀( $\alpha_5$ ) 매개변수는 통계적 매우 유의수준이나 값은 0.0633으로 시간에 따른 변화는 다소 증가하는 것으로 분석되었다.

T-P의 회귀계수,  $\alpha_1$ 도 통계적으로 유의한 양의 값으로 분석되어 유량과 관련성이 높은 것으로 분석되었다. 시간에 대한 회귀계수,  $\alpha_5$ 의 경우 통계적으로 유의한 증가 경향을 보

이는 것으로 나타났다.

BOD 및 T-P는 회귀계수( $\alpha_3, \alpha_4$ )가 유의한 값으로 계절성을 나타내는 것으로 분석되었다(Table 9).

3.3.2 풍영정천 경향성 분석

풍영정천 BOD 회귀계수의 유의수준(p)은 매우 유의한 것으로 분석되었다(Table 10). BOD의 분석 결과, 회귀계수( $\alpha_1$ )의 매개변수는 1.0662로 양의 값으로 분석되어 유량 증가에 영향을 받으며, 계절성 회귀( $\alpha_4$ ), 시간 회귀( $\alpha_6$ )는 양의 값이나 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

T-P 회귀식 회귀계수( $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ )의 유의수준(p)은 매우 유의, 회귀계수( $\alpha_6$ )는 유의하지 않은 것으로 나타났다. T-P의 회귀계수( $\alpha_1$ )의 매개변수는 유의한 양의 값으로 유량 증가 영향으로 증가하는 것으로 나타났으며, 시간에 따른 변화는 증가로 분석되었다(Table 11).

3.3.3 평동천 경향성 분석

평동천 BOD 회귀계수의 유의수준(p)은 회귀계수( $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_6$ ) 매우 유의수준 이상이고,  $\alpha_5$ 은 유의하지 않은 것으로 분석되었다(Table 12).

BOD의 분석 결과, 회귀계수( $\alpha_1$ )의 매개변수가 양의 값으로 분석되어 유량의 증가에 영향을 받으며, 시간 회귀( $\alpha_5$ )는 양의 값이나 유의하지 않은 결과로 나타났다.

T-P 회귀식 회귀계수( $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ )의 유의수준(p)은 매우 유의, 회귀계수( $\alpha_6$ )는 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

BOD 및 T-P는 회귀계수( $\alpha_1$ )의 매개변수는 각 1.1025, 1.0248로 유량 증가의 영향으로 증가하는 것으로 나타났다.

Table 8. Comparison of the water quality item load and maximum load calculated for Pyeongdongchen.

Item	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	R <sup>2</sup>
BOD	6.1797**	0.8775**	0.0961**	-0.3315**	0.0905*	0.0633**	-0.0506**	62.52
T-P	2.8260**	1.2014**	0.1202**	-0.0959*	0.1154**	0.0811**	-0.0294*	75.11

\*\* : Highly significant, \* : Significant

Table 9. AMLE regression statistics for Gwangjuchen2

Item	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
BOD	Std. Dev.	0.0529	0.0494	0.034	0.0448	0.0436	0.0219
	T-ratio	116.85	17.76	2.83	-7.40	2.07	2.90
	P Value	3.56E-203	1.66E-45	4.37E-03	1.28E-12	3.61E-02	3.57E-03
T-P	Std. Dev.	0.0525	0.049	0.0337	0.0445	0.0433	0.0217
	T-ratio	53.86	24.51	3.57	-2.16	2.66	3.74
	P Value	4.22E-131	2.47E-66	3.55E-04	2.93E-02	7.23E-03	1.85E-04

Table 10. AMLE variable value of the calculated LOADEST model for Pungyeongjeongchen

Item	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	R <sup>2</sup>
BOD	5.9617**	1.0662**	0.0719**	-0.3312**	0.0393	0.0697**	0.0039	82.18
T-P	2.7791**	1.1954**	0.0786**	-0.1454**	0.1293**	0.0934**	0.0039	89.16

\*\* : Highly significant, \* : Significant



**Table 11.** AMLE regression statistics for Pungyeongjeongchen

Item		$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
BOD	Std. Dev.	0.0511	0.0371	0.0213	0.0371	0.0399	0.0191	0.0144
	T-ratio	116.56	28.76	3.38	-8.92	0.99	3.65	0.27
	P Value	3.95E-198	5.15E-77	7.03E-04	6.90E-17	3.17E-01	2.57E-04	7.81E-01
T-P	Std. Dev.	0.0432	0.0313	0.018	0.0314	0.0337	0.0161	0.0122
	T-ratio	64.26	38.13	4.37	-4.63	3.84	5.79	0.32
	P Value	4.77E-144	3.50E-99	1.40E-05	4.30E-06	1.26E-04	1.47E-08	7.47E-01

**Table 12.** AMLE variable value of the calculated LOADEST model for Pyeongdongchen

Item	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	R <sup>2</sup>
BOD	4.7277**	1.1025**	0.0366*	-0.2062**	0.0915**	0.0004	0.0445**	90.54
T-P	2.1345**	1.0248**	0.0739**	-0.1424**	-0.1760**	0.0563**	-0.0132	89.41

\*\* : Highly significant, \* : Significant

**Table 13.** AMLE regression statistics for Pyeongdongchen

Item		$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
BOD	Std. Dev.	0.0441	0.03	0.0183	0.0355	0.04	0.0175	0.013
	T-ratio	107.23	36.72	2.00	-5.80	2.29	0.02	3.42
	P Value	3.84E-189	1.27E-95	4.34E-02	1.37E-08	2.09E-08	9.81E-01	6.03E-04
T-P	Std. Dev.	0.0404	0.0275	0.0168	0.0326	0.0367	0.0161	0.0119
	T-ratio	52.78	37.22	4.40	-4.37	-4.79	3.50	-1.11
	P Value	5.78E-126	1.06E-96	1.22E-05	1.40E-05	2.09E-06	4.45E-04	2.61E-01

시간에 따른 변화는 T-P만 통계적으로 유의하게 증가하는 것으로 나타났으며 계절성을 나타내는 회귀계수( $\alpha_3, \alpha_4$ )는 매우 유의로 동절기에 증가하는 것으로 분석되었다(Table 13).

는 계절성을 따르는 것으로 분석되었다. 또한, 광주천2, 풍영정천, 평동천 모두 오염원은 유량에 의한 변동성이 계절성이나 시간의 흐름에 따른 변동보다 큰 것으로 해석되었다.

### 4. Conclusion

본 연구에서는 영산강 수계의 오염총량 단위유역 광주천2, 풍영정천, 평동천을 대상으로 수질 경향성을 분석하고자 장기간 관측자료를 LOADEST에 적용하여 모델에 내제된 회귀식을 통한 수질의 경향성을 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) LOADEST의 모의 결과는 관측값과의 통계적 변량에서 적절한 범위로 나타나 LOADEST의 결과값이 관측치를 잘 반영하여 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 풍영정천과 같이 관측자료의 편차가 큰 지점의 경우에는 통계적 변량에서 등급이 낮아지는 것으로 분석되었다. LOADEST의 특성을 고려하여 적용하여야 한다.
- 2) 대상지점의 오염부하량의 경향성을 파악한 결과, 부하량의 변동성은 유량 의존성을 나타내고 있으며 시간에 따라 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, BOD 및 T-P

- 3) 본 연구의 대상지점의 부하량의 경향성은 시간에 따라 증가하는 것으로 분석되었다. 연구의 대상지점은 영산강 본류로 유입되는 하천으로 해당 단위유역의 수질관리를 위해서는 오염원의 관리가 필요하다. 대상지점은 도심하천으로 비점오염원과의 관련성이 높은 하천이다. 따라서, 유역 수체의 효과적 오염원 관리하기 위해서는 비점오염원 관리가 필요하다.

- 4) 수질오염총량 단위유역에서 관측된 수질 및 유량 실측 자료를 활용하여 수질의 경향성을 분석한 결과, LOADEST의 매개변수를 활용한 수질의 영향 인자, 경향성 분석이 가능하였다. LOADEST의 결과를 토대로 유량 변화 영향을 배제한 수질 증·감 파악 가능하며, 유량 증·감에 따른 수질 변화 경향성 분석이 가능하다. 향후, 장기간 관측된 모니터링자료를 LOADEST에 적용하여 수질 경향성을 분석한다면 수질관리 정책의 수립 및 평가에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 영산강·섬진강 수계관리위원회 “소유역 하천 모니터링 사업”의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. (No. 1345-402-260-01).

## References

- Ahn, J. M., Lee, I. J., Jung, K. Y., Kim, J., Lee, K. C., Cheon, S., and Lyu, S. W. (2016). Characteristics of trend and pattern for water quality monitoring networks data using seasonal-kendall, SOM and RDA on the Mulgeum in the Nakdong river, *Journal of Environmental Science International*, 25(3), 361-371. [Korean Literature]
- Choi, H. M., Cho, Y. C., Lee, B. M., Ryu, I. G., Kim, S. H., Shin, D. S., and Yu, S. J. (2021). Trend analysis for river water quality change before and after the prohibition of ocean dumping of livestock manure, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(2), 75-91. [Korean Literature]
- Choi, O. Y., Kim, H. T., Seo, H. S., and Han, I. S. (2017). Analysis of water quality changes & characterization at the watershed in Han river basin for target indicator in TMDLs, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(1), 15-33. [Korean Literature]
- Cohn, T. A., Calder, D. L., Gilroy, E. J., Zynjuk, L. D., and Summers, R. M. (1992). The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads—An empirical study Involving nutrient loads entering Chesapeake bay, *Water Resources Research*, 28(9), 2353-2363.
- Cohn, T. A., Gilroy, E. J., and Baier, W. G. (1992). Estimating fluvial transport of trace constituents using a regression model with data subject to censoring, *Proceedings of the Joint Statistical Meeting*, Boston, 42-151.
- Han, M. D., Son, J. Y., Ryu, J. C., Ahn, K. H., and Kim, Y. S. (2014). The effects of pollutants into sub-basin on the water quality and loading of receiving streams, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 36(9), 648-658. [Korean Literature]
- Helsel, D. R. and Hirsch R. M. (2002). *Statistical methods in water resources*, U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, 510.
- Kim, J. G., Park, Y. S., Lee, S. R., Shin, Y. C., Lim, K. J., and Kim, K. S. (2017). Study of selection of regression equation for flow-conditions using machine-learning method: Focusing on Nakdonggang waterbody, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 59(4), 97-107. [Korean Literature]
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Na, E. H. and Park, S. S. (2003). Continuity simulation and trend analysis of water qualities in incoming flows to lake Paldang by log linear models, *Korean Journal of Limnology*, 36(3), 336-343. [Korean Literature]
- Park, Y. S. (2014). Estimation of pollutant load using genetic-algorithm and regression mode, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 33(1), 37-43. [Korean Literature]
- Runkel, R. L., Crawford, C. G., and Cohn, T. A. (2004). *Load estimator (LOADEST): A fortran program for estimating constituent loads in streams and rivers*, U.S. Geological survey, Techniques and Methods Report, Reston, Virginia.
- Shin, M. H., Seo, J. Y., Choi, Y. H., Kim, J. G., Shin, D. S., Lee, Y. J., Jung, M. S., Lim, K. J., and Choi, J. D. (2009). Evaluation of LOADEST model applicability for NPS pollutant loads estimation from agricultural watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(2), 212-220. [Korean Literature]
- Yu, J. J., Shin, S. H., Yoon, Y. S., and Song, J. K. (2010). Long-term water quality trend analysis with NTrend 1.0 program in Nakdong river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(6), 895-902. [Korean Literature]