



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2022년 2월

석사학위 논문

# LOADEST 모델을 이용한 영산강수계의 수질 경향성 분석

조선대학교 대학원

토목공학과

이 기 순

# LOADEST 모델을 이용한 영산강수계의 수질 경향성 분석

Trend Analysis of Water Quality Data in Yeongsan River  
Watershed Using LOADEST Model

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

이 기 순

# LOADEST 모델을 이용한 영산강수계의 수질 경향성 분석

지도교수 김 성 흥

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

토목공학과

이 기 순

## 이기순의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박정웅 (인)

위원 조선대학교 교수 정명훈 (인)

위원 조선대학교 교수 김성홍 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

# 목차

## ABSTRACT

제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 연구내용 및 방법 .....	3
2.1 연구내용 및 대상 지역 .....	3
2.2 LOADEST 모델 .....	5
2.2.1 LOADEST 회귀식 .....	6
2.2.2 LOADEST 입·출력구조 .....	8
제 3 장 기초자료 및 수질현황 .....	10
3.1 대상지점별 관측자료 .....	10
3.2 대상지점별 오염부하량 산정결과 .....	21
제 4 장 LOADEST 기반 오염부하량 및 분석 .....	25
4.1 지점별 LOADEST 회귀식 및 오염부하량 산정결과 .....	25

4.2	지점별 LOADEST 모형의 회귀분석	30
4.2.1	BOD 부하량 회귀식 분석결과	32
4.2.2	T-P 부하량 회귀식 분석결과	33
4.3	지점별 매개변수 분석	40
4.4	수질 경향성 분석	46
제 5 장 요약 및 결론		48
참고문헌		49

# 표 목 차

표 2.1 LOADEST 회귀식 적용 조건 .....	3
표 2.2 지점별 하상특성 .....	5
표 3.1 광주천2 수질측정자료(최소, 최대, 평균) .....	11
표 3.2 풍영정천 수질측정자료(최소, 최대, 평균) .....	13
표 3.3 황룡강3-1 수질측정자료(최소, 최대, 평균) .....	15
표 3.4 평동천 수질측정자료(최소, 최대, 평균) .....	17
표 3.5 지식천4 수질측정자료(최소, 최대, 평균) .....	19
표 3.6 지점별 부하량 산정결과(최소, 최대, 평균) .....	22
표 4.1 LOADEST 모형 회귀식 자동선택 .....	26
표 4.2 LOADEST 부하량 산정결과(최소, 최대, 평균) .....	27
표 4.3 일반적인 통계적 등급 (월 단위 모의 기준) .....	31
표 4.4 BOD 부하량의 회귀식 검증결과 .....	33
표 4.5 T-P 부하량의 회귀식 검증결과 .....	34
표 4.6 광주천2 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증 .....	40
표 4.7 풍영정천 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증 .....	42
표 4.8 황룡강3-1 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증 .....	43
표 4.9 평동천 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증 .....	44



표 4.10 지식천4 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증 .....45

표 4.11 LOADEST 회귀식(9번) AMLE 매개변수 .....47

표 4.12 LOADEST 회귀식(0번 자동선택) AMLE 매개변수 .....47

# 그림 목 차

그림 2.1	지점별 측정 위치 .....	4
그림 2.2	LOADEST 모형 처리 모식도 .....	5
그림 2.3	LOADEST 모형 입·출력구조 .....	9
그림 3.1	단위유역별 강우량 .....	10
그림 3.2	광주천2 월별 유량 및 수질측정자료 .....	12
그림 3.3	풍영정천 월별 유량 및 수질측정자료 .....	14
그림 3.4	황룡강3-1 월별 유량 및 수질측정자료 .....	16
그림 3.5	평동천 월별 유량 및 수질측정자료 .....	18
그림 3.6	지석천4 월별 유량 및 수질측정자료 .....	20
그림 3.7	지점별 월별 BOD 부하량 산정결과 .....	23
그림 3.8	지점별 월별 T-P 부하량 산정결과 .....	24
그림 4.1	LOADEST 모의 조건1, 조건2의 BOD 부하량 산정결과 .....	28
그림 4.2	LOADEST 모의 조건1, 조건2의 T-P 부하량 산정결과 .....	29
그림 4.3	BOD, T-P에 대한 부하량 산포도 .....	35
그림 4.4	BOD, T-P에 대한 부하량 산포도 .....	36
그림 4.5	BOD, T-P에 대한 부하량 산포도 .....	37
그림 4.6	BOD, T-P에 대한 부하량 산포도 .....	38

그림 4.7 BOD, T-P에 대한 부하량 산포도 .....39

## ABSTRACT

### Trend Analysis of Water Quality Data in Yeongsan River Watershed Using LOADEST Model

LEE, Kee Soon

Advisor : Prof KIM, Sung Hong, Ph.D

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, water quality trends are analyzed using the measurement data of the Yeongsan River water quality forecasting point(Gwangjucheon2, Pungyeongjeongcheon, Hwangryonggang3-1, Pyeongdongcheon, Jiseokcheon4)which is a part of the water quality measurement network

The water quality trend analysis of the target site was analyzed by applying the flow rate, BOD, and T-P among the measured data to the LOADEST model, and applying condition 1 (regression expression No. 9) and condition 2 (automatic selection No. 0). The difference in the actual load was analyzed by simulating the load through the regression equation of the LOADEST model, and the suitability of the regression equation of the LOADEST model for each point was analyzed. By analyzing the parameters according to the regression formula according to the simulation of the LOADEST model, the trends according to flow rate, season, and time were analyzed, and the significance was tested using a statistical method (P-value). The simulation results according to the conditions (1,2) of the LOADEST model showed that there was little difference between the actual load and the load.

The maximum values (outliers) at some points (Gwangjucheon2 Hwangryonggang3-1, Pyeongdongcheon, Jiseokcheon4)were calculated by underestimating the results of the LOADEST simulation. NSE, PBIAS, and RSR were analyzed to evaluate the

suitability of the load simulated by the LOADEST model and the actual load. As a result of NSE analysis, except for the load regression analysis on the T-P of the Pyeongdongcheon, the remaining points were “satisfactory” or higher, indicating that the simulation results reflected the actual measurements well. As a result of BOD and T-P regression analysis, PBIAS was found to be “satisfactory” or higher. RSR was evaluated as high suitability as it showed a grade of “good” or higher at most points as a standard deviation ratio.

The significance (P-value) of the parameters of the regression equation according to the conditions (1, 2) of the regression equation for each point by the LOADEST model was mostly analyzed as highly correlated and very significant. As a result of the parameter analysis, it was analyzed that the parameters ( $a_0 \sim a_2$ ) indicating the trend of the flow rate had a large parameter value in common at the target point and were mostly significant. The parameters ( $a_0 \sim a_2$ ) showed that the values of parameters and P-values increased at some points (Pungyeongjeongcheon, Hwangryonggang3-1, Pyeongdongcheon) under condition 2. It was analyzed that the regression parameters of the LOADEST model had a high correlation with the flow rate, and that the correlation between the seasonal cycle and the year-round change cycle was different depending on the location.

As a result of analyzing the parameters ( $a_3, a_4$ ) reflecting the change cycle according to the seasons as conditions (1, 2), most of the target points were negative (-) in the Sin cycle, and the significance level was usually analyzed, so the Sin cycle showed a tendency to change in water quality with a cycle opposite to that of Cos cycle was analyzed as positive (+), but mostly insignificant results were shown.

As a result of the analysis according to condition 1 for the parameters ( $a_5, a_6$ ) related to year-round time, the values of the parameters at the target point except for Pyeongdongcheon were low, but most showed significant results. In the analysis according to condition 2, Pungyeongjeongcheon, Hwangryonggang3-1, and Pyeongdongcheon were calculated and analyzed by regression equations that do not include parameters ( $a_5, a_6$ ), indicating that there is little correlation with time. As a result of the simulation of the LOADEST model, it was analyzed that the simulated value was underestimated at the

specific flow rate (high flow rate) at the target point, so it was necessary to review and correct the measurement data.

In this study, by using long-term measurement data to analyze the load and water quality trends of water quality factors, it is expected to be used as data for policies for using basic data and for water quality management.

## 제 1 장 서론

우리나라는 도시화 산업화로 인해 생활 및 산업폐수의 양적 증가에 따라 환경 정책을 수립하고 시행하고 있다. 물관리 정책의 일환으로 수질오염총량관리제를 도입하여 기존의 농도규제에서 벗어나 부하량 중심의 유역관리 정책과 공공수역의 수질예보와 사전예방적 수질관리를 위한 수질예보제를 시행중에 있다. 수질오염총량제는 관리하고자 하는 하천의 목표수질을 정하고 이를 달성하고 유지하기 위해 수질오염물질의 허용부하량(허용총량)을 산정하여 해당 유역에서 배출되는 오염물질의 부하량을 허용총량이하로 규제 또는 관리하는 제도를 말한다.(환경부, 2008) 수질오염총량관리제의 효율적인 수질관리를 위해 이행평가 보고서 작성 및 해당 단위유역 내 시·군 경계지점 목표수질 평가를 위한 목적으로 4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강)수계 및 수질예보제를 중심으로 수질 및 유량 모니터링을 시행하고 있다. 수질오염총량관리제 시행에 따른 실측자료는 연구유역에 대한 장기간의 유량 및 수질자료로 대상오염물질의 효율적인 관리를 위한 정책의 평가에 활용된다. 이에 환경부(2008)는 오염부하량 증·감 내역과 예측을 위한 오염부하량 산정을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

현재 오염부하량을 추정하는 방법으로 원단위법, 수질모형을 이용한 모의, 유량-부하량 관계식 등이 있다. 원단위법은 오염물질과 토지이용에 단위면적당 부하량에 면적이거나 오염원을 곱하여 산출하는 방법으로 많이 이용되지만, 오염물질별 원단위에 따라 미치는 영향과 비점오염원물질의 운송기작을 파악할 수 없는 단점이 있다.(박승수, 2006) 수질모형을 이용한 모의는 대부분 매개변수 기반으로 오염물질의 기작 및 이송과정을 모의하고 예측할 수 있고, 유역 내 다양한 조건을 적용하여 오염부하량을 모의하고 수문이나 수질 모의 과정을 자세히 나타낼 수 있는 장점이 있다. 하지만 DEM, 토지이용 등 공간분포형 입력자료로 인한 많은 매개변수로 인해 모의 과정이 복잡해지고 보정하는데 있어 많은 시간과 과정을 요구하는 불편함이 있다.(강문성, 2009) 유량-부하량 관계식은 수질모형보다 간단하게 오염부하량을 추정 및 산출할 수 있고, 주로 통계적 분석에 관한 회귀식을 사용하여 부하량을 산정할 수 있다. 최근에는 미국 USGS(United States Geological Survey)에서 개발한 회귀식 기반 프로그램 LOADEST(LOAD Estimator)를 이용하여 오염부하량을 추정하고 있다. 오염부하량을 추정하기 위한 LOADEST 관련 연구는 국내에서

도 다양하게 진행되었다. 효과적인 하천 오염부하량 산정을 위한 NI방법 및 ESTIMATOR, LOADEST 모형 적용 및 평가(장원석 외 2011), 비점오염부하 산정을 위한 LOADEST 모형의 적용성 평가(신민환 외 2008), 농촌유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모형의 적용성 평가(신민환 외 2009)있고, 한강수계에서의 부유사 예측을 위한 LOADEST 모형의 회귀식 평가(박윤식 외 2015), 머신러닝 기법을 활용한 유황별 LOADEST 모형의 적정 회귀식 선정 연구:낙동강 수계를 중심으로(김종건 외 2017), 유역특성에 따른 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정(김계웅 외 2018)등 여러 연구사례가 있다.

오염부하량의 산정을 위한 LOADEST 모형의 모의는 실측된 유량 및 수질 자료를 통계 분석하여 산정되며, 수문 모델이나 실측을 통해 구축된 유량 자료를 회귀식에 대입하여 모의함으로써 산정한다.(엄명철, 2004)

이에 본 연구에서는 환경부에서 시행 중인 장기간 모니터링 자료를 LOADEST 모형에 활용 및 모의하여 대상지점의 부하량을 산정하였다. 산정된 부하량은 관측된 부하량과의 적합성을 통계적으로 비교 분석하고 LOADEST 모형에 적용된 회귀식을 바탕으로 대상지점의 수질의 특성을 분석하였다. 또한 대상지점의 회귀식의 변수를 분석하여 수질의 경향성을 분석하여 수질관리를 위한 자료로 활용하고자 한다.



## 제 2 장 연구내용 및 방법

### 2.1 연구내용 및 대상 지역

본 연구에서는 영산강수계의 수질예보 지점인 광주천2, 풍영정천, 평동천, 황룡강3-1, 지석천4를 대상으로 관측된 유량 및 수질 자료를 활용하여 오염부하량의 경향성을 미국 USGS(United States Geological Survey)에서 개발한 회귀식 기반 프로그램 LOADEST(LOAD Estimator)를 이용하여 모의하였다.

대상 유역의 유량 및 수질 자료는 환경부 물환경정보시스템(Water Information System, WIS)에서 2016년부터 2020년까지 7~10일 단위로 측정된 자료를 수집하였다. 유량측정과 수질측정은 측정일, 측정시간이 동일한 자료를 이용하였다. 자료의 수는 유역별 최소 220개에서 최대 280개의 자료를 사용하였다. 강우량자료는 환경부 물환경정보시스템(Water Information System, WIS)에서 측정 지점의 인근 수위국 자료를 일강우량을 기준으로 사용하였다.

LOADEST 모델에 의해 모의된 부하량을 평가하는 방법으로는 결정계수(coefficients of determination,  $R^2$ ), NSE(Nash Sutcliffe Efficiency), RSR(Root mean Square error-observation standard deviation Ratio), PBIAS(Percent BIAS)를 사용하여 평가하였다.

LOADEST 모델의 회귀식 적용은 표 2.1과 같이 일반적으로 장기적인 모니터링자료 분석에 사용되는 회귀식 9번 회귀식(조건1)과 LOADEST 모델에서 입력자료를 최적화한 회귀식을 적용하는 0번 회귀식(조건2)로 구분하여 모의하였다. 적용된 회귀식의 매개변수분석을 통하여 대상지점의 수질 변화추세를 파악하였다.

**표 2.1 LOADEST 회귀식 적용 조건**

조건	회귀식 적용 조건	비고
1	사용자 회귀식 지정	LOADEST 회귀식 9번
2	LOADEST 최적화 회귀식 선택	LOADEST 회귀식 0번(자동선택)

본 연구의 대상 유역은 영산강수계의 수질예보 지점의 광주천2, 풍영정천, 평동천, 황룡강3-1, 지석천4를 선택하였다. 지점별 측정 위치를 그림 2.1에 표시하였다. 표 2.2에는 지점별 하상 특성을 단위유역별로 구분하였다.

광주천2는 영본B 단위유역이며 영산강 상류 중권역의 도시하천으로 유량과 수질은 상류의 보와 광주하수처리장의 영향을 받는다. 유역길이는 34.07km, 유역면적은 131.52km<sup>2</sup>이다. 풍영정천은 영본B 단위유역 중 영산강 상류 중권역으로, 상류는 하남산단을 지나 영산강에 합류하며 유역길이 및 면적은 16.11km, 68.93km<sup>2</sup>이다.

평동천은 영본B 단위유역으로 영산강 제1지류이며, 유역특성은 하천의 좌우에 논 배수호가 존재하며 유역길이는 13.31km, 유역면적은 33.76km<sup>2</sup>이다. 황룡강3-1은 영본B 단위유역 중 측정 위치는 황룡강 중권역 말단구간에 위치에 있고, 유역길이는 52.74km, 유역면적은 567.37km<sup>2</sup>이다. 지석천4는 영본C 단위유역이며 측정 위치는 지석천 말단구간에 위치에 있다. 좌, 우안에는 갈대가 많이 있고, 유역길이 및 면적은 53km, 662.35km<sup>2</sup>이다.

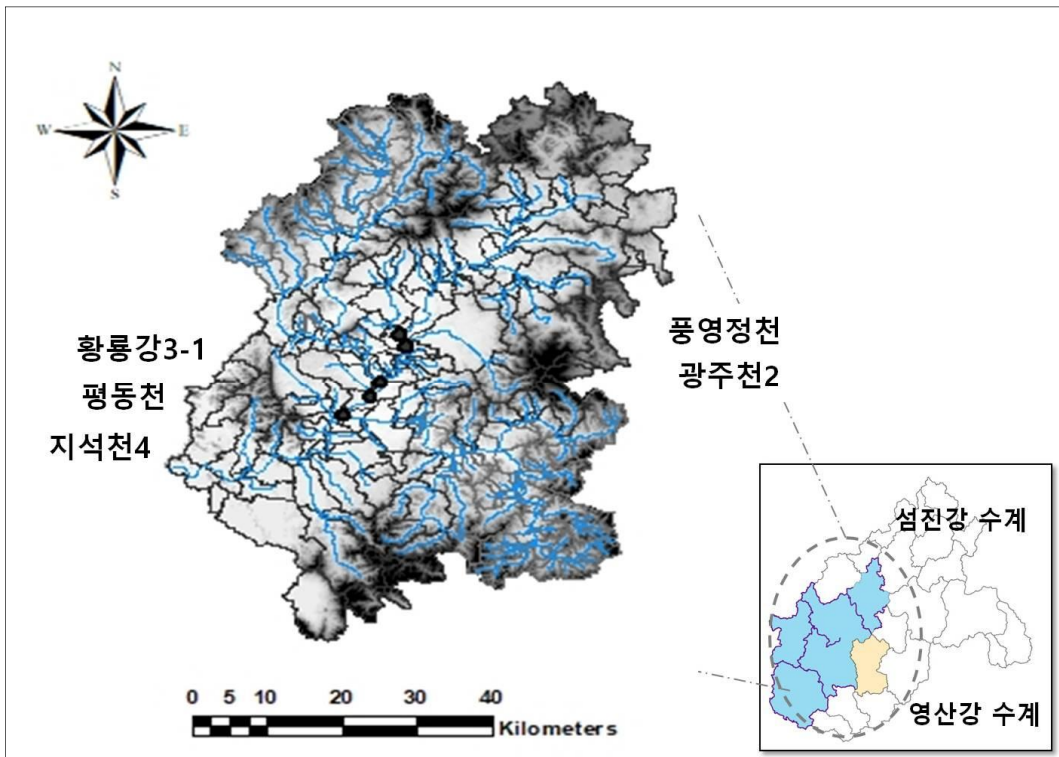


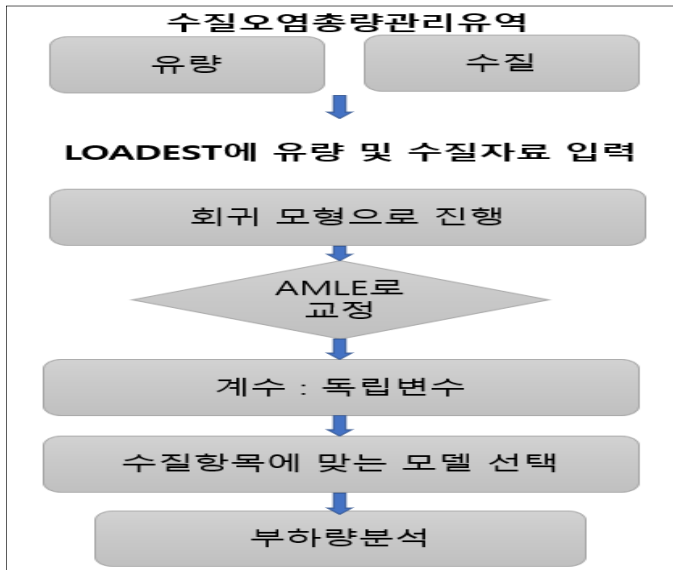
그림 2.1 지점별 측정 위치

**표 2.2 지점별 하상 특성**

단위유역	대상지점	하상 특성
영본B	광주천2	· 주로 암반과 굵은 자갈로 구성
영본B	풍영정천	· 모래와 자갈로 구성
영본B	평동천	· 굵은 자갈과 모래로 구성
영본B	황룡강3-1	· 주로 모래와 자갈로 구성
영본C	지석천4	· 굵은 자갈과 모래로 구성

## 2.2 LOADEST 모델

LOADEST 모델은 유량과 시간에 따라 변화하는 하천의 오염부하를 산정하기 위해 개발된 회귀식 기반 오염부하 산정프로그램이다. LOADEST 모델은 사용자가 입력한 기간의 오염부하를 산정할 수 있고, 실측된 유량 및 수질자료를 이용하여 오염부하를 추정하고 회귀식의 매개변수를 보정 하여 사용자가 최적 회귀모델을 선택할 수 있도록 하는 모형이다. 또한 월별로 산정된 오염부하의 적절성에 대하여 월평균 오염부하의 데이터와 95% 신뢰수준에 대한 통계적인 분석이 가능하다.(Runkel et al., 2004) 그림 2.2는 LOADEST 모델의 처리 과정을 모식도로 나타낸 것이다.



**그림 2.2 LOADEST 모델 처리 모식도**

### 2.2.1 LOADEST 회귀식

본 LOADEST 모델에서는 11가지의 회귀식을 제시하고 있으며, 유역의 특성에 맞게 유량과 수질의 상관관계를 가장 잘 반영하고 있는 회귀식을 선정하여 연속적인 오염부하량을 산정한다. 회귀식 1번과 2번의 경우 유량에 대한 독립변수만을 고려한 회귀식으로 유량과 수질 간의 상관관계가 큰 경우 적용이 가능하고, 회귀식 3번부터 9번은 유량 자료와 연중 환산 시간을 고려하여 계절적인 특성 반영이 가능한 회귀식이다. 회귀식 10번과 11번은 측정 기간이 다른 다수의 측정 지점의 부하량을 측정하는데 적용이 가능한 회귀식이다. LOADEST 회귀식의  $\ln Q$ ,  $\ln Q^2$ 식 앞의 매개변수는 유량에 영향을 주는 매개변수이다. Sin식과 Cos식 앞의 매개변수는 (-)와 (+)영향으로 계절의 변화 주기에 상관성이 있고,  $dtime$ 식과  $dtime^2$ 식의 매개변수는 측정 기간과 관련하여 영향을 미치는 매개변수이다.

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q \quad (1)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 \quad (2)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 dtime \quad (3)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi dtime) + a_3 \cos(2\pi dtime) \quad (4)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 dtime \quad (5)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime) \quad (6)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi dtime) + a_3 \cos(2\pi dtime) + a_4 (dtime) \quad (7)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime) + a_5 dtime \quad (8)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime) + a_5 dtime + a_6 dtime^2 \quad (9)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Qper \quad (10)$$

$$\ln y = a_0 + a_1 per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Qper + a_4 \ln Q^2 + a_5 \ln Q^2 per \quad (11)$$

LOADEST 회귀식에서  $y$ 는 오염부하량(kg/d)  $Q$ 는 유량(m<sup>3</sup>/d)이고,  $\ln Q = (\bar{Q} - \tilde{Q})$ 는 유량에서 중앙값을 뺀 값을 로그를 취한 값을 나타내며,  $dtime = (T - \tilde{T})$ 으로 연중시간을 0 ~ 1의 소수로 환산한 값에서 중앙값을 뺀 값으로 연중 시간적 특성을 고려하는 변수이다.  $per$ 은 사용자가 정의한 기간이다.  $T$ 는 시간(year)이고  $\tilde{Q}$ ,  $\tilde{T}$ 는 중심변수(Centering Variables)이다. 9번 회귀식은 매개변수  $a_5$ ,  $a_6$ 로  $A$ (진폭)와  $D^*$ (첨두시간)을 구할 수 있다.

$$A = (\alpha_5^2 + \alpha_6^2)^{1/2} \quad (12)$$

$$D^* = \frac{365}{2\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\alpha_5}{\alpha_6} \right) \right] \quad (13)$$

식(13)는  $D$ 는 첨두시간으로 최소 농도가 발생하면 최대 농도는 6개월 후에 발생하는 시간을 나타낸다. 식(14), 식(15)는  $A$ 와  $D$ 의 표준 오차로 1차 테일러 시리즈(First-order Taylor series)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$SE[A] \approx \frac{[\alpha_5^2 Var(\alpha_5) + \alpha_6^2 Var(\alpha_6)]^{1/2}}{A} \quad (14)$$

$$SE[D^*] \approx \frac{365}{2\pi} \frac{[\alpha_5^2 Var(\alpha_5) + \alpha_6^2 Var(\alpha_6)]^{1/2}}{A} \quad (15)$$

위 식에서  $Var(a) = a$ 의 분산이다. 중심 변수  $\tilde{Q}$ ,  $\tilde{T}$ 는 예측에 영향을 주지 않으면서 계산을 단순화하며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tilde{T} = \bar{T} + \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^3}{2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (16)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (17)$$

### 2.2.2 LOADEST 입 · 출력구조

LOADEST 모델의 입력자료는 그림 2.3과 같이 Control File, Calibration File, Estimation File, Header File으로 총 4개의 파일로 구성되어 있다. Control File은 다양한 입력 파일의 파일정보를 저장하고 있으며, Calibration File은 해당 유역에서 유량 및 수질 농도의 관계를 설명해 줄 수 있는 최적의 회귀식을 결정하는데, 활용되며 실측 수질자료가 많으면 정확성이 높은 회귀식 선정을 할 수가 있다.

LOADEST 모델에서는 오염부하를 산정할 때 Adjusted Maximum Likelihood Estimation(AMLE)와 Maximum Likelihood Estimation(MLE), Least Absolute Deviation(LAD)의 방법이 사용된다. AMLE는 Calibration File에서 데이터의 이상값 또는 오류값을 수정할 때 사용되고, 실측 수질 자료를 그대로 사용했을 경우는 MLE 방법이 사용된다. 또한 LAD 방법은 잔차가 정규분포를 따르지 않을 때 사용된다.(Cohn et al., 1992b; Cohn, 2005).

Estimation File은 선정된 최종 회귀식을 활용하여 실측 및 예측 유량으로 오염부하량을 산정하는데 사용된다. Header File은 LOADEST 모델을 실행하는데 필요한 입력 정보를 포함하고 있다. 계절적인 영향을 고려하기 위해 기간을 설정하고, 모의 결과에 대한 오염부하와 농도의 단위를 결정하는데 Header File이 사용된다.

4개의 입력파일을 준비하고 LOADEST 모델을 실행하면 출력파일(Echo File, Constituent File, Residual File, Individual load File)이 생성된다. Echo File에는 설정한 입력데이터들에 대한 정보가 저장되며 실행단계에서 발생하는 에러에

대한 정보도 저장되어 잘못 입력된 데이터를 쉽게 찾아낼 수 있다. Constituent File은 두 개의 구성요소로 구분되어 있는데 첫 부분은 오염부하를 산정하는데 있어 다양한 방법으로 회귀식을 산정하는 과정을 기록하며 마지막 부분은 산정된 월별 평균 오염부하를 저장한다. Residual File은 Calibration File에 입력된 데이터들의 잔차에 관한 내용을 저장한다. 최종적으로 Individual File은 입력한 날짜와 유량과 수질로 산정된 일 오염부하를 산정한다.

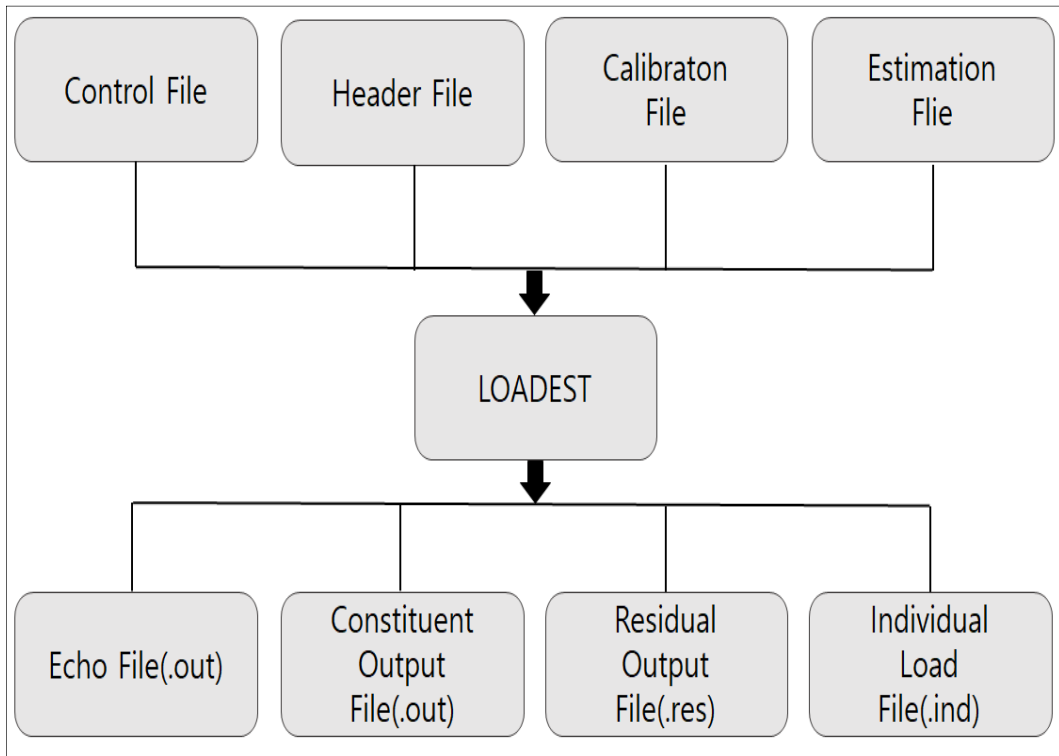


그림 2.3 LOADEST 모델 입·출력구조

## 제 3 장 기초자료 및 수질현황

### 3.1 대상 지점별 관측자료

본 연구에서는 2016년부터 2020년까지 환경부에서 유량 및 수질 항목 DO(용존산소), BOD(생화학적 산소요구량), T-P(총인)을 동시 측정된 자료를 월평균으로 최대, 최소, 평균을 분석하였으며, 대상지점의 단위유역에 대한 일강우량으로 산정하였다. 그림 3.1은 영본B와 영본C 단위유역의 일강우량을 나타낸 것이다. 연구 대상지점의 단위유역 강우량은 티센법에 의해 산정하였으며, 기상청 자료를 활용하였다. 영본B 단위유역은 광주관측소 자료를 티센계수를 1로 곱하여 산출하였으며, 2016년부터 2020년까지의 평균 강우량은 13mm이고 최고강우량은 259mm(2020년)로 나타났다. 2020년에는 7월, 8월이 높은 강우량을 나타내었다. 연도별 최저 강우량은 1월과 12월이 적은 강우량을 보여주었다. 영본C 단위유역은 광주, 목포, 장흥 관측소의 강우량을 티센계수를 각각 0.721, 0.048, 0.231을 적용해서 산출하였으며, 평균 강우량은 11mm로 최고강우량은 202mm(2020년)로 가장 많았다. 공통적으로 6월부터 8월까지 강우량이 많았고, 1월부터 3월까지와 11월, 12월이 적은 강우량을 나타냈다.

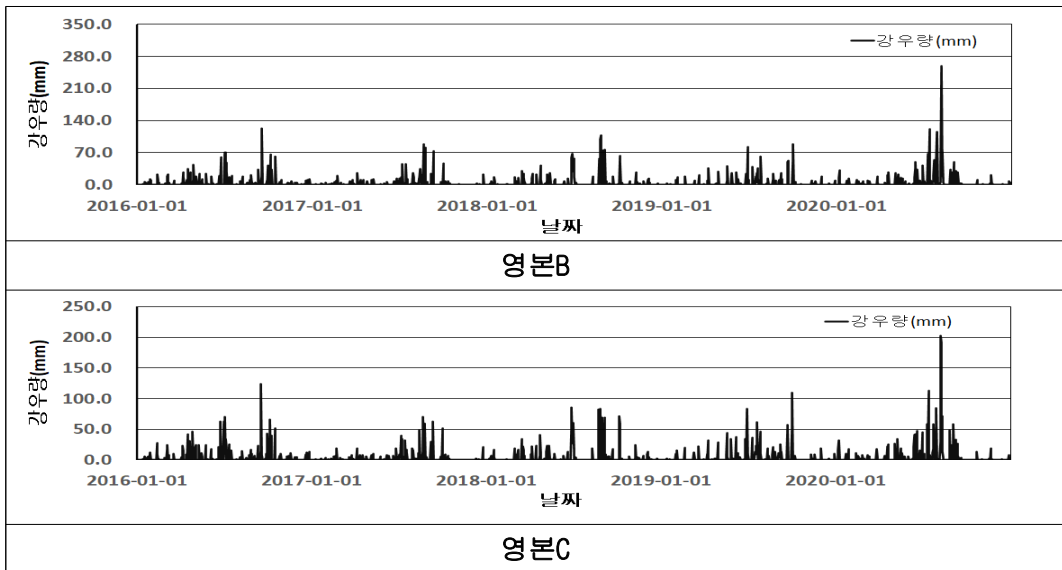


그림 3.1 단위유역별 강우량



**(1) 광주천 2**

표 3.1에 연도별로 DO, BOD, T-P 및 유량을 월별 최소, 최대, 평균으로 분석하였다. 그림 3.2에 유량은 매주 측정된 값을 그래프로 나타냈고, DO, BOD, T-P을 월 평균으로 분석하였다.

광주천 2의 유량 범위(평균)는 0.077m<sup>3</sup>/s ~ 17.339m<sup>3</sup>/s(1.404m<sup>3</sup>/s)로 나타났다. 그림 3.2의 유량을 보면 12m<sup>3</sup>/s 이상의 고유량과 평균 이상의 유량은 하절기(6월 ~ 9월)에 따른 강우의 영향을 많이 받았다. 저·갈수기에는 상류의 보의 영향으로 저유량으로 측정되는 경향이 있는 것으로 나타났다. BOD 범위(평균)는 0.9mg/L ~ 14.5mg/L(4.3mg/L), T-P 범위(평균)는 0.046mg/L ~ 0.982mg/L(0.146mg/L)로 관측되었으며, 현장 측정항목 DO 범위(평균)는 4.0mg/L ~17.5mg/L(10.2)로 나타났다.

**표 3.1 광주천2 수질측정자료(최소, 최대, 평균)**

년	지점	광주천 2			
		DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)	유량 (m <sup>3</sup> /s)
2016년	최소	8.4	1.3	0.073	0.9
	최대	14.4	7.5	0.367	2.8
	평균	10.6	3.5	0.129	1.6
2017년	최소	5.7	2.5	0.078	0.7
	최대	14.3	7.1	0.301	2.5
	평균	10.5	4.8	0.133	1.2
2018년	최소	7.8	2.4	0.085	0.6
	최대	14.8	7.1	0.286	4.9
	평균	10.0	4.6	0.160	1.8
2019년	최소	7.1	1.5	0.066	0.7
	최대	15.6	8.5	0.337	1.7
	평균	10.1	4.5	0.166	1.1
2020년	최소	6.8	2.2	0.092	0.8
	최대	13.4	6.6	0.201	3.3
	평균	10.2	4.5	0.149	1.4

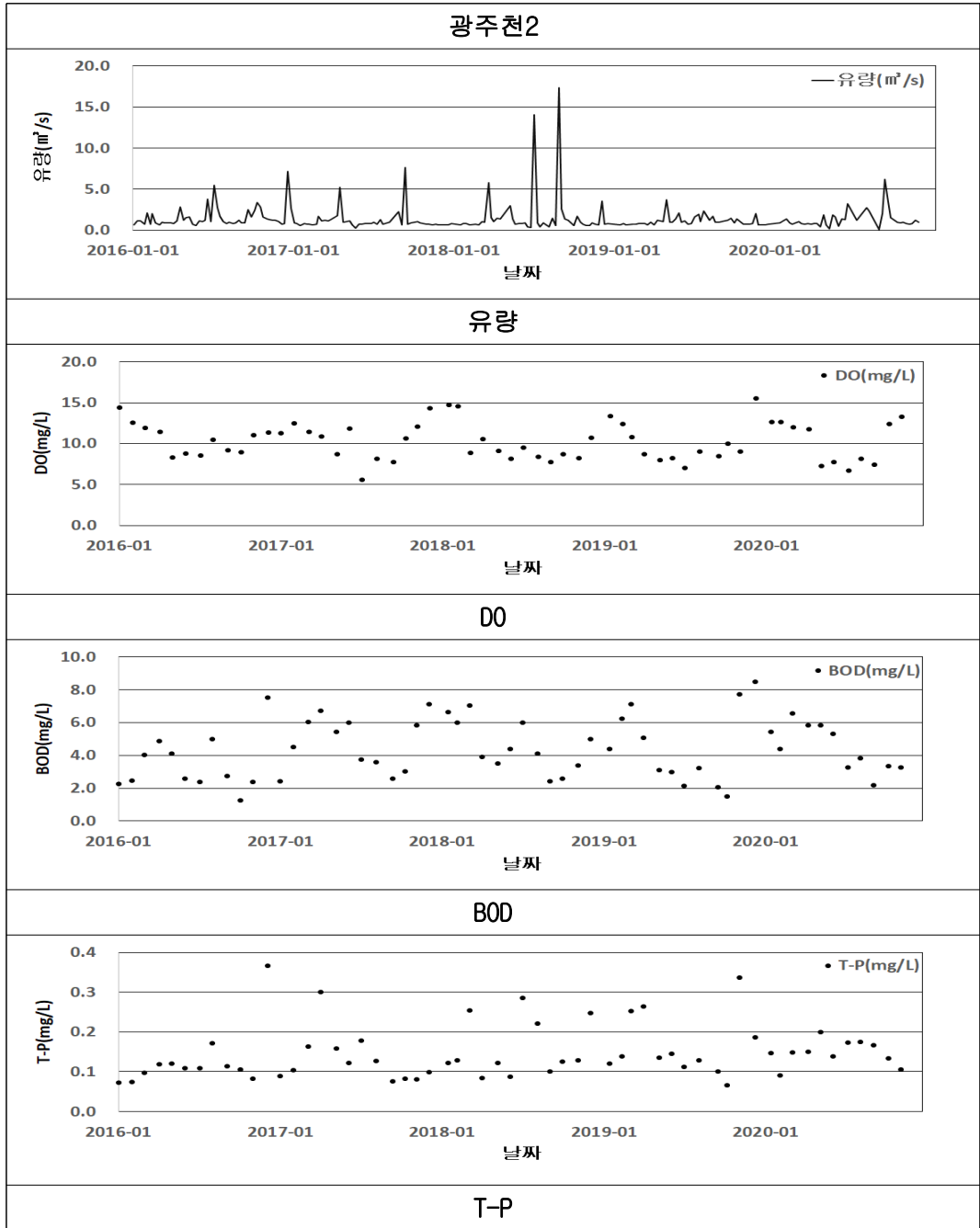


그림 3.2 광주천2 유량 및 수질측정자료

**(2) 풍영정천**

표 3.2에 연도별로 DO, BOD, T-P 및 유량을 월별 최소, 최대, 평균으로 분석하였다. BOD 범위(평균)는 1.0mg/L ~ 9.8mg/L(3.3mg/L), T-P 범위(평균)는 0.048mg/L ~ 0.408mg/L(0.127mg/L)로 관측되었으며, 현장 측정항목 DO 범위(평균)는 5.3mg/L ~ 19.1mg/L(10.9mg/L)로 나타났다.

풍영정천의 유량 범위(평균)는 0.130m<sup>3</sup>/s ~ 40.627m<sup>3</sup>/s(1.452m<sup>3</sup>/s)으로 나타났고 그림 3.3에 유량을 보면 하절기에 강우에 따른 일시적인 유량의 증가는 2017년과 2018년에 20m<sup>3</sup>/s 이상의 유량을 제외하고는 풍영정천은 강우에 따른 유량의 변동이 적은 것으로 관측되었다.

**표 3.2 풍영정천 수질측정자료(최소, 최대, 평균)**

년	지점 항목	풍영정천			
		DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)	유량 (m <sup>3</sup> /s)
2016년	최소	8.3	1.7	0.058	0.9
	최대	15.4	3.7	0.208	3.4
	평균	11.3	2.6	0.112	1.4
2017년	최소	6.7	2.0	0.083	0.5
	최대	14.7	7.2	0.165	12.2
	평균	11.4	3.9	0.111	1.8
2018년	최소	7.8	1.7	0.100	0.5
	최대	15.3	5.1	0.197	10.8
	평균	10.6	3.0	0.133	1.9
2019년	최소	7.3	1.6	0.074	0.3
	최대	15.3	4.8	0.247	1.2
	평균	11.2	3.3	0.132	0.9
2020년	최소	6.8	2.2	0.083	0.4
	최대	15.2	6.3	0.204	2.5
	평균	10.9	3.7	0.138	1.0

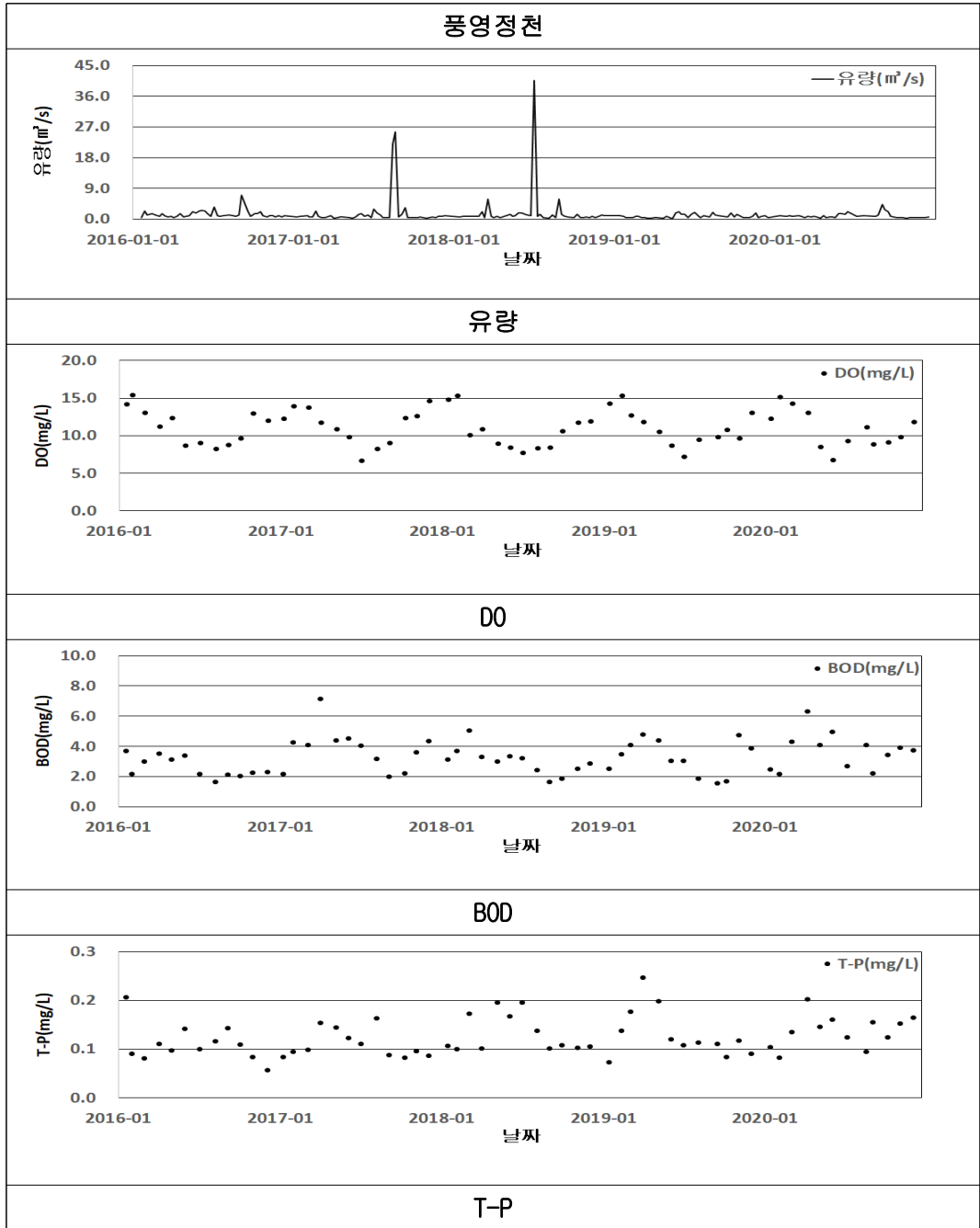


그림 3.3 풍영정천 유량 및 수질측정자료

**(3) 황룡강3-1**

표 3.3에 연도별로 DO, BOD, T-P 및 유량을 월별 최소, 최대, 평균으로 분석하였다. 그림 3.4는 유량은 매주 측정된 자료를 그래프로 나타냈고, DO, BOD, T-P을 월평균으로 분석하였다. 황룡강 3-1의 유량 범위는 0.854m<sup>3</sup>/s ~ 18.007m<sup>3</sup>/s로 나왔고, 평균유량은 5.436m<sup>3</sup>/s로 많이 나왔다. 지석천4를 제외한 다른 대상지점의 최저 유량과 평균유량을 비교해보면 2m<sup>3</sup>/s 이상 많이 측정되었고, 6월부터 9월까지 하절기 강우의 영향과 강우에 따른 유량의 변동이 큰 경향이 있다.

BOD 범위(평균)는 0.8mg/L ~ 7.5mg/L(2.9mg/L), T-P 범위(평균)는 0.035mg/L ~ 0.780mg/L(0.084mg/L)로 관측되었으며, 현장 측정항목 DO 범위(평균)는 5.2mg/L ~ 17.8mg/L(11.2mg/L)로 나타났다.

**표 3.3 황룡강3-1 수질측정자료(최소, 최대, 평균)**

년	지점 항목	황룡강3-1			
		DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)	유량 (m <sup>3</sup> /s)
2016년	최소	7.6	1.2	0.050	3.8
	최대	15.2	3.7	0.217	14.3
	평균	11.0	2.3	0.085	7.4
2017년	최소	6.8	1.6	0.060	1.9
	최대	14.7	4.6	0.108	8.7
	평균	11.1	3.0	0.075	4.2
2018년	최소	6.7	1.8	0.068	1.4
	최대	16.0	4.4	0.114	9.9
	평균	10.8	2.8	0.085	5.5
2019년	최소	7.8	2.2	0.047	1.8
	최대	15.2	6.2	0.144	10.9
	평균	11.0	3.3	0.093	4.7
2020년	최소	7.7	0.9	0.054	2.6
	최대	15.6	4.8	0.093	14.6
	평균	11.4	3.1	0.074	6.6

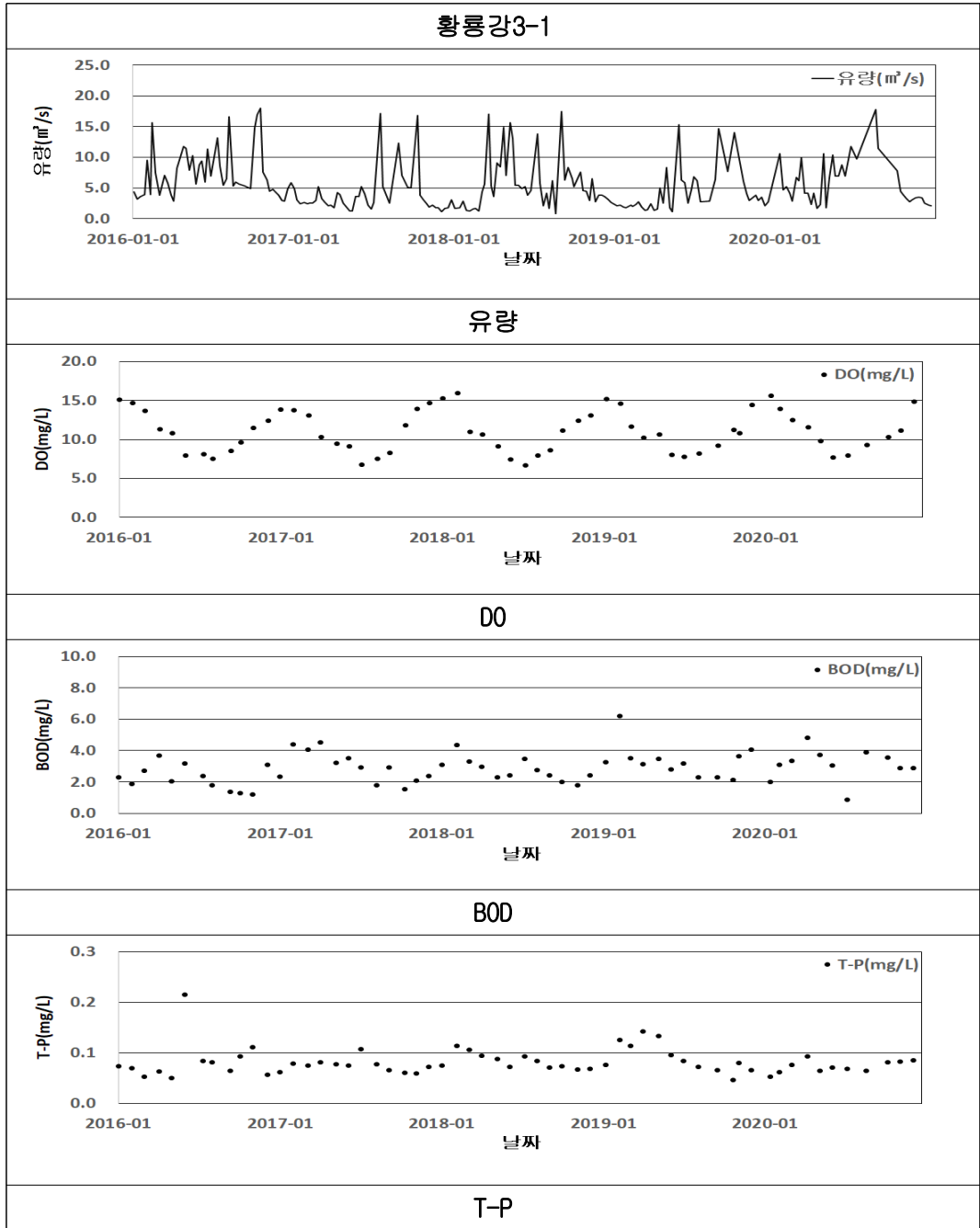


그림 3.4 황룡강3-1 유량 및 수질측정자료

#### (4) 평동천

표 3.4에 연도별로 DO, BOD, T-P 및 유량을 월별 최소, 최대, 평균으로 분석하였고, 그림 3.5는 유량 및 DO, BOD, T-P를 그래프로 나타냈다.

평동천의 유량 범위(평균)는 0.040m<sup>3</sup>/s ~ 8.341m<sup>3</sup>/s(0.558m<sup>3</sup>/s)으로 나왔다. 평균유량은 0.558m<sup>3</sup>/s으로 대상지점 중에 가장 적게 측정되었다.

BOD 범위(평균)는 1.3mg/L ~ 13.4mg/L(3.4mg/L), T-P 범위(평균)는 0.100mg/L ~ 0.883mg/L(0.240mg/L)로 관측되었으며, 현장 측정항목 DO 범위(평균)는 3.7mg/L ~ 16.9mg/L(10.0mg/L)로 나타났다.

표 3.4 평동천 수질측정자료(최소, 최대, 평균)

년	지점	평동천			
		DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)	유량 (m <sup>3</sup> /s)
2016년	최소	6.7	1.9	0.144	0.2
	최대	15.8	4.8	0.289	1.6
	평균	10.4	3.6	0.196	0.6
2017년	최소	5.3	2.0	0.134	0.1
	최대	13.4	6.5	0.404	4.0
	평균	9.3	3.5	0.265	0.7
2018년	최소	7.1	2.1	0.131	0.1
	최대	13.9	6.0	0.309	1.4
	평균	10.4	3.1	0.228	0.7
2019년	최소	8.0	2.2	0.143	0.1
	최대	14.3	4.6	0.370	0.9
	평균	10.4	3.2	0.257	0.4
2020년	최소	7.4	2.5	0.117	0.1
	최대	13.3	6.9	0.382	1.2
	평균	10.4	3.5	0.253	0.4

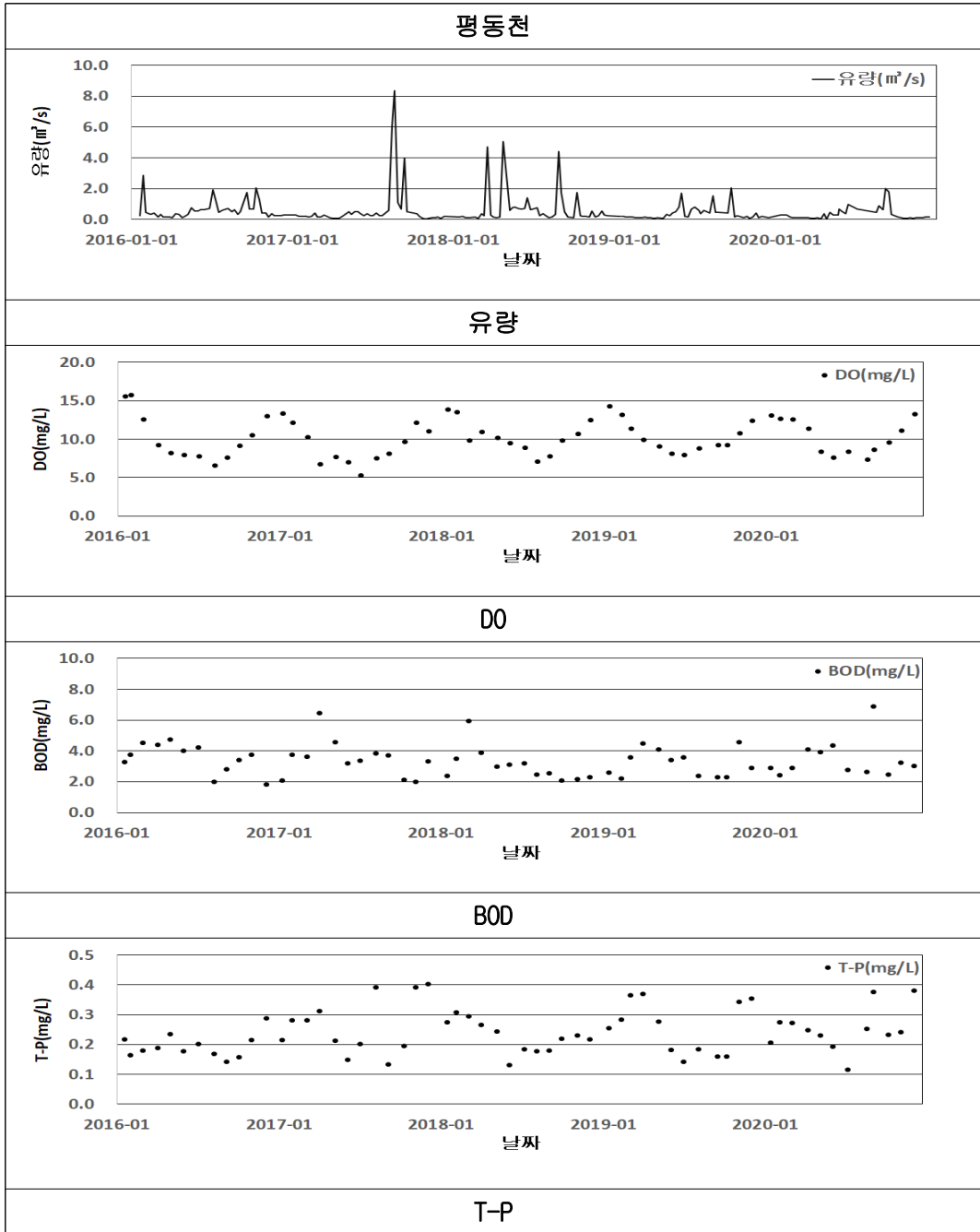


그림 3.5 평동천 유량 및 수질측정자료



**(4) 지석천4**

지석천4의 유량 및 수질항목을 그림 3.6에 그래프로 나타냈다. 유량을 보면 10m<sup>3</sup>/s 이상의 유량과 평균유량이 5.806m<sup>3</sup>/s 이상으로 측정되는 6월부터 9월까지의 하절기에 따른 강우의 영향을 많이 받아 유량이 많이 나타나는 경향이 있다. 표 3.5는 연도별로 DO, BOD, T-P 및 유량을 월별 최소, 최대, 평균으로 분석하여 나타냈다.

유량범위(평균)는 0.240m<sup>3</sup>/s ~ 42.211m<sup>3</sup>/s(5.806m/s)이고, BOD 범위(평균)는 0.7mg/L ~ 8.0mg/L(2.3mg/L), T-P 범위(평균)는 0.049mg/L ~ 0.345mg/L(0.134mg/L)로 관측되었으며, 현장 측정항목 DO 범위(평균)는 4.7mg/L ~ 19.1mg/L(11.3mg/L)로 나타났다.

**표 3.5 지석천4 수질측정자료(최소, 최대, 평균)**

년	지점 항목	지석천4			
		DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)	유량 (m <sup>3</sup> /s)
2016년	최소	7.5	1.3	0.085	4.4
	최대	16.2	2.6	0.158	21.6
	평균	11.0	1.8	0.124	9.4
2017년	최소	5.6	1.3	0.092	0.8
	최대	14.4	5.0	0.225	13.1
	평균	10.5	2.6	0.153	4.5
2018년	최소	6.2	1.1	0.106	1.7
	최대	15.8	4.0	0.220	10.2
	평균	10.5	2.2	0.150	4.9
2019년	최소	8.9	1.0	0.062	2.0
	최대	15.2	4.0	0.188	9.9
	평균	11.6	2.4	0.129	4.9
2020년	최소	7.8	0.7	0.067	2.4
	최대	15.3	4.0	0.176	12.9
	평균	11.9	2.6	0.103	6.6

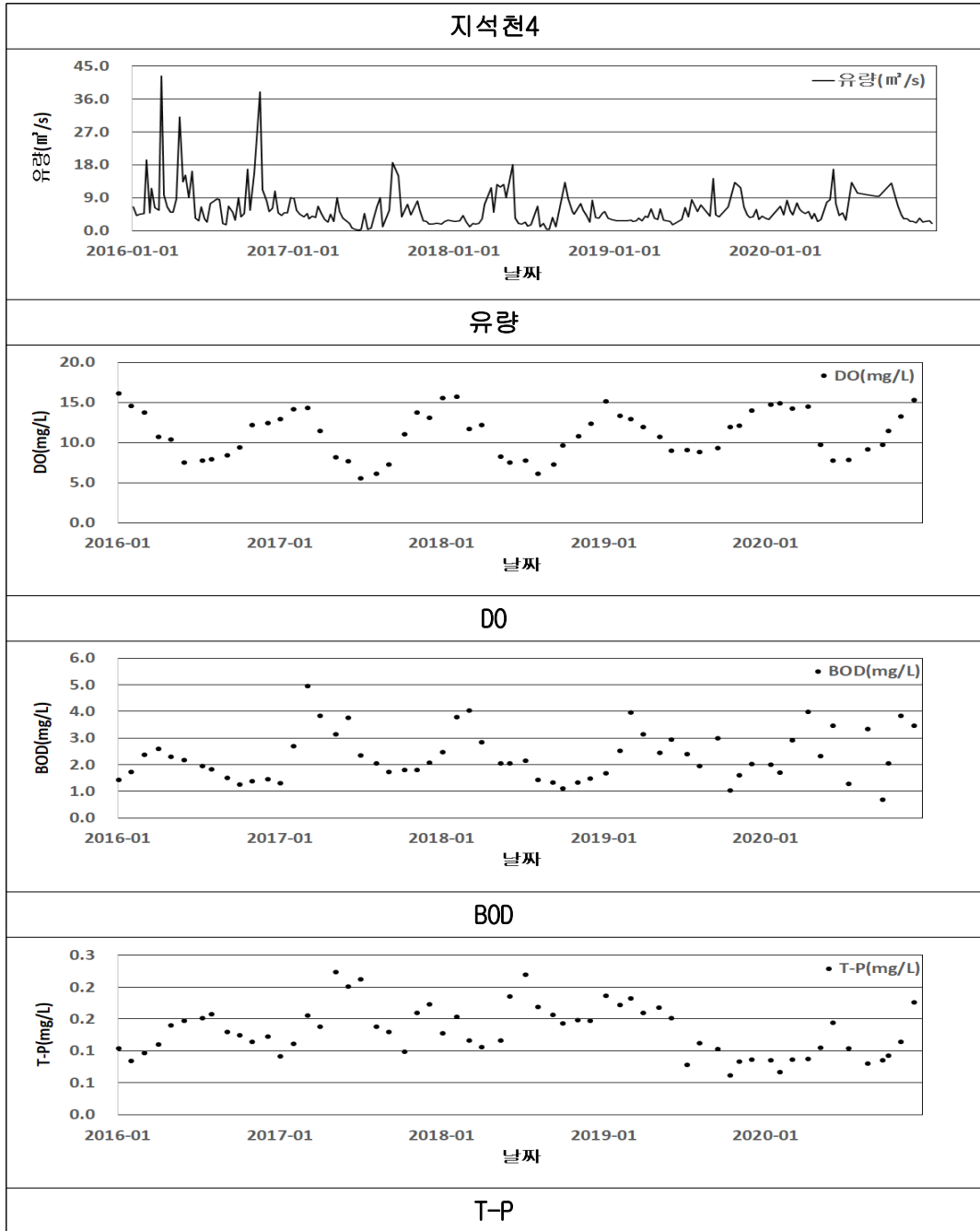


그림 3.6 지석천4 유량 및 수질측정자료

### 3.2 대상지점별 오염부하량 산정결과

LAODEST 모델의 회귀식에 따른 부하량과의 비교 및 평가를 하기 위해 실측한 유량과 수질을 곱하여 대상지점의 부하량을 산정하였다. 표 3.6에는 지점별 BOD, T-P 부하량을 최대, 최소, 평균으로 분석하였고, 지점별 월별 BOD, T-P 부하량을 그림 3.7과 그림 3.8에 나타내었다. 황룡강3-1과 지석천4지점은 하절기에 따른 강우에 영향으로 부하량 산정에 유량의 영향이 크기 때문에 월별 부하량 차이가 큰 경향을 보였다. 광주천2, 풍영정천, 평동천지점은 강우에 따른 유량의 변동은 이 적은 측정 결과 강우로 인한 유량이 많게 측정된 날을 제외 하고 월 부하량 차이는 적은 결과를 나타냈다.

광주천2의 오염부하량 산정 결과 최대부하량은 BOD 2384kg/d(2018년), T-P 181kg/d(2018년)이고, 최저평균 부하량은 BOD 391kg/d(2019년), T-P 14kg/d(2017년)로 적게 산정되었다. 평균 부하량은 BOD 724Kg/d(2018년), T-P 46Kg/d(2018년)를 제외하고 평균 BOD 부하량은 391 ~ 501Kg/d, T-P 부하량은 14 ~ 21Kg/d 범위를 나타냈다.

풍영정천의 최대부하량은 BOD 4496kg/d(2017년), T-P 365kg/d(2018년)으로 나타났으며, 최저평균 부하량은 BOD 252kg/d(2019년), T-P 10kg/d(2019년)로 적게 산정되었다. 평균 부하량은 BOD 667Kg/d(2017년) T-P 45Kg/d(2018년)를 제외하고 평균 BOD 부하량은 252 ~ 638Kg/d, T-P 부하량은 10 ~ 31Kg/d 범위를 나타냈다.

황룡강3-1의 최대부하량은 BOD 4874kg/d(2020년), T-P 194kg/d(2016년)이고, 최저평균 부하량은 BOD 981kg/d(2017년), T-P 29kg/d(2017년)로 적게 산정되었다. 평균 부하량은 BOD 1702Kg/d(2020년), T-P 61Kg/d(2016년)를 제외하고 평균 BOD 부하량은 981 ~ 1393Kg/d, T-P 부하량은 29 ~ 42Kg/d 범위를 나타냈다.

평동천의 최대부하량은 BOD 1697kg/d(2017년), T-P 216kg/d(2017년)으로 나타났으며, 최저평균 부하량은 BOD 123kg/d(2019년), T-P 7kg/d(2020년)로 적게 산정되었다. 평균 부하량은 BOD 250Kg/d(2017년), T-P 24Kg/d(2017년)를 제외하고 평균 BOD 부하량은 123 ~ 241Kg/d, T-P 부하량은 7 ~ 16Kg/d 범위를 나타냈다.

지석천4의 최대부하량은 BOD 3161kg/d(2016년), T-P 245kg/d(2016년)이고, 최저평균 부하량은 BOD 850kg/d(2018년), T-P 49kg/d(2019년)로 적게 산정되었다. 평균 부하량은 BOD 1465Kg/d(2016년), T-P 97Kg/d(2016년)를 제외하고 평균 BOD 부하량은 850 ~ 1260Kg/d, T-P 부하량은 49 ~ 58Kg/d 범위를 나타냈다.

**표 3.6 지정별 부하량 산정결과(최소, 최대, 평균)**

년	지점 항목	광주천2		풍영정천		황룡강3-1		평동천		지석천4	
		BOD (kg/d)	T-P (kg/d)	BOD (kg/d)	T-P (kg/d)	BOD (kg/d)	T-P (kg/d)	BOD (kg/d)	T-P (kg/d)	BOD (kg/d)	T-P (kg/d)
2016년	최소	185	5	163	4	494	22	45	3	628	47
	최대	2181	107	796	52	2581	194	544	36	3161	245
	평균	501	21	367	17	1393	61	206	11	1465	97
2017년	최소	166	5	93	4	347	10	19	3	252	16
	최대	1345	53	4497	276	2147	87	1697	216	2338	171
	평균	456	14	667	31	981	29	250	24	937	53
2018년	최소	191	4	106	5	514	13	35	3	185	23
	최대	2384	181	3996	365	2273	85	816	54	2368	123
	평균	724	46	638	45	1220	42	241	16	850	58
2019년	최소	119	6	109	5	545	13	25	3	396	27
	최대	751	42	474	24	2131	72	205	13	1986	82
	평균	391	16	252	10	1205	35	123	8	959	49
2020년	최소	260	7	109	4	629	18	25	2	737	27
	최대	830	48	777	38	4874	81	804	26	2718	96
	평균	471	17	293	12	1702	38	149	7	1260	55

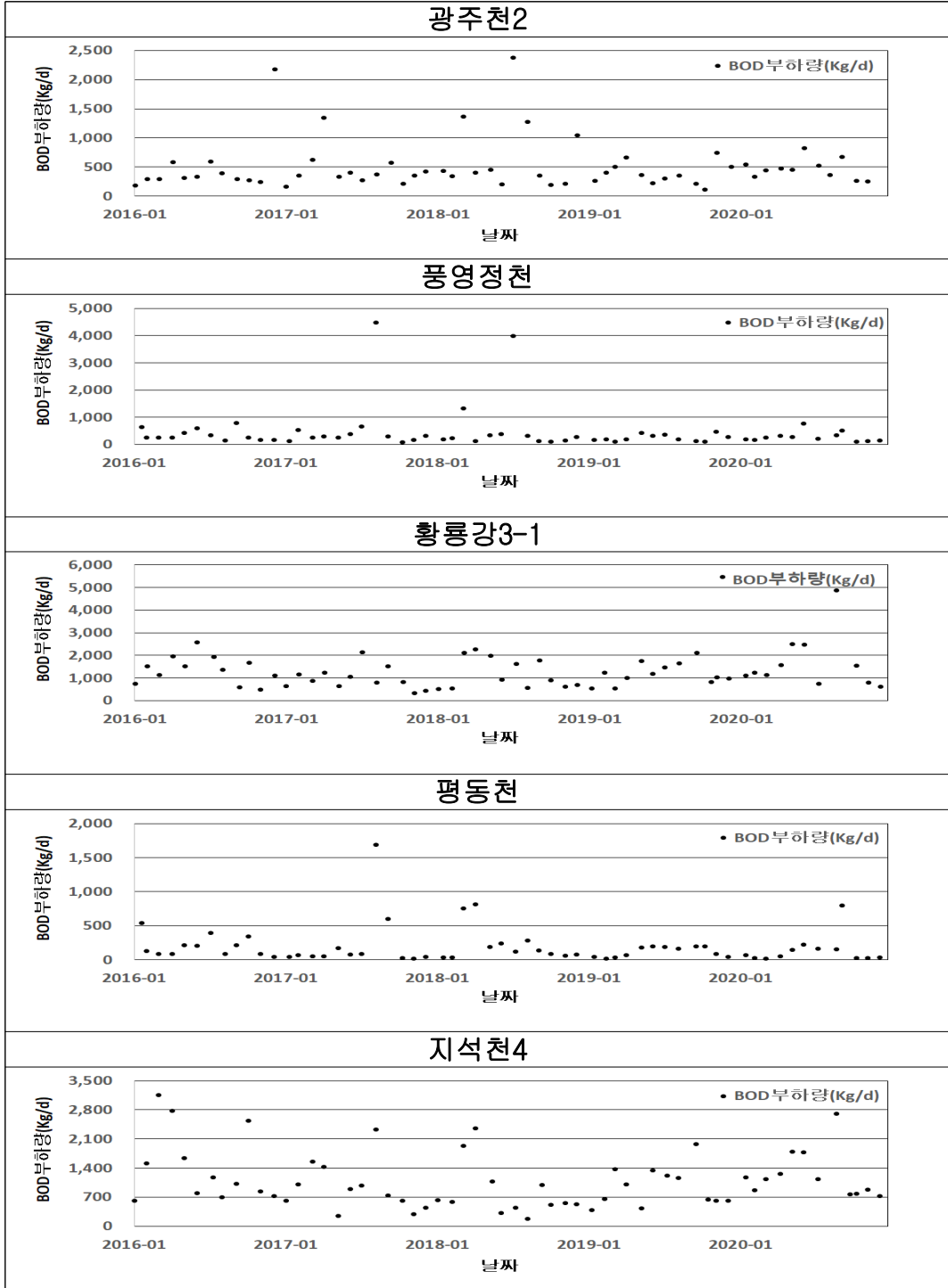


그림 3.7 지점별 월별 BOD 부하량 산정결과

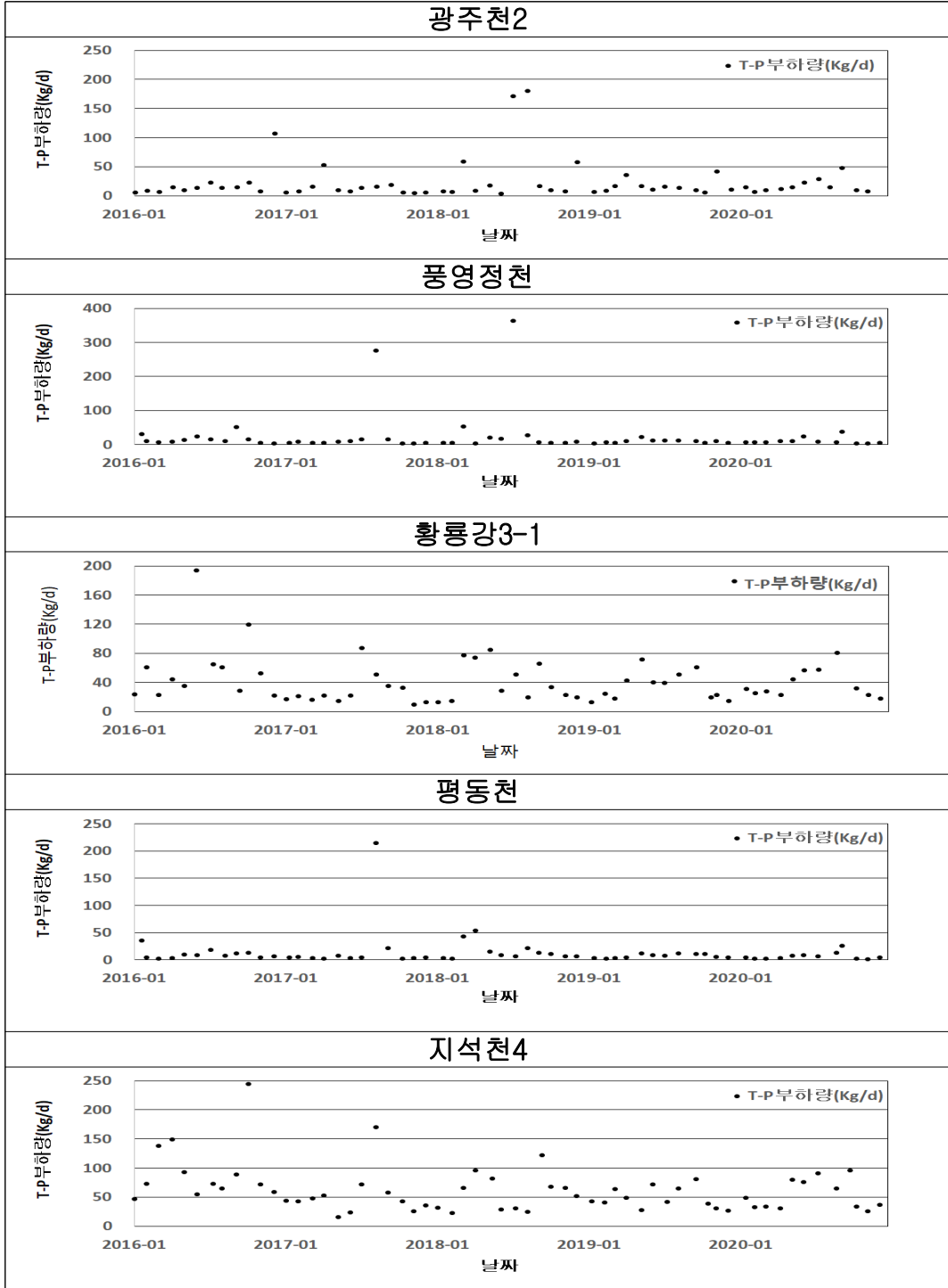


그림 3.8 지점별 월별 T-P 부하량 산정결과

## 제 4장 LOADEST 기반 오염부하량 및 분석

### 4.1 지점별 LOADEST 회귀식 및 오염부하량 산정결과

LOADEST 모델에 적용된 회귀식의 매개변수를 분석하였다. 회귀식의 적용은 장기 간 모니터링 자료를 사용하는데, 장점이 있는 조건1(9번 회귀식)과 LOADEST 모델에서 입력자료를 최적화한 회귀식을 적용하는 조건2(자동 선택)로 구분하였다. 표 4.1는 지점별 LOADEST 모델 회귀식의 자동 선택에 따른 선택 결과를 나타낸 표로 BOD는 조건2에서 광주천2, 평동천, 지석천4는 9번 회귀식이 적용되었으며, 풍영정천은 8번 회귀식, 황룡강3-1은 7번 회귀식으로 분석하였다. T-P는 조건2에서의 황룡강3-1은 6번 회귀식을 적용하였으며, 지석천4, 광주천2는 9번 회귀식, 풍영정천, 평동천은 8번 회귀식으로 분석되었다. 회귀식의 결정계수( $R^2$ )는 (최동호 등 외 2012)  $R^2$ 값이 0.6 이상이면 회귀곡선의 추세선을 잘 반영한다고 제안하였는데, 조건1과 조건2에서 63% ~ 91%로 분석되어 상관성은 높고, 조건별 차이는 적은 것으로 분석되었다. LOADEST 모델에서 최적의 회귀식을 적용한 조건2의 경우 선택된 회귀식은 측정자료의 주기가 7 ~ 10일 간격으로 측정되었고, 일정 횟수 이상 장기 간 측정된 자료의 특성에 의해 회귀식이 적용된 것으로 분석되었다.

풍영정천은 조건2에서 BOD와 T-P의 회귀식은 각각 8번이 선정되었으나, 결정계수( $R^2$ )는 조건1(9번 회귀식)과 작은 차이로 분석되어 매개변수가 모델값에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. 또한, 조건2(회귀식 0번 선택)일 때 LOADEST 모델의 회귀식 선정은 결과값이 큰 차이를 보이지 않은 지점의 경우 유량, 계절과 시간에 대한 매개변수를 최소화하는 특성이 있는 것으로 나타났다. 황룡강 3-1의 경우 조건2에서 BOD의 회귀식은 7번, T-P는 6번이 선정되었다.(Runkel et al., 2004; Park, 2014)등은 일반적으로는 자료의 기간에 의해 분할 하여 보정과 검정 과정을 거치나, 회귀식은 보정된 자료의 기간보다 클 경우, 유역 내 토지이용 현황 변화와 같은 유역의 장기간에 걸친 변화나 자료 기간에 대한 외삽치등이 회귀식의 거동에 영향을 줄 수 있고 하였다. 황룡강3-1은 측정기간에 하천 정비공사와 강우로 인한 하상의 변화와 측정 위치 변경, 강우로 인한 유량 증가에 따른 이상치와 유량과 수질의 상이 한 측정 시기 등의 원인으로 판단된다.

표 4.1 LOADEST 모델 회귀식 자동선택

지점 회귀식	BOD LOADEST 회귀식	T-P LOADEST 회귀식
광주천2	9번	9번
풍영정천	8번	8번
황룡강3-1	7번	6번
평동천	9번	8번
지석천4	9번	9번

지점별 실측부하량과 LOADEST 조건1과 조건2에 따른 BOD, T-P 부하량을 최대, 최소, 평균을 표 4.2에 나타내었고, 그림 4.1과 4.2에는 일별 BOD 부하량과 T-P 부하량을 나타내었다.

광주천2의 조건1과 조건2에 대한 BOD, T-P 부하량의 회귀식 선정은 9번 회귀식으로 선정되었다. 회귀식에 의해 모의 된 평균 부하량은 각각 BOD 492.6kg/d, T-P 22.4kg/d로 산정되었으며, 실측부하량(평균)은 적게 모의 된 결과로 대부분 모의 된 부하량은 과소 평가되는 것으로 산정되었다.

풍영정천의 조건1에 대한 BOD, T-P의 평균 부하량은 BOD 512.4kg/d, T-P 28.3kg/d로 나타났다. 조건2에 대한 BOD 부하량의 회귀식은 8번 회귀식으로 되었고, 평균 부하량은 512.7kg/d이다. T-P 부하량의 회귀식은 8번 회귀식으로 평균 부하량은 28.3kg/d로 산정되었다. 조건1, 조건2의 BOD, T-P 부하량은 적은 차이가 나는 결과를 보였으며, 실측부하량보다 모의 된 부하량이 많은 결과로 과대 평가되는 결과를 보였다.

황룡강3-1의 조건1에 대한 BOD, T-P 부하량 산정 결과 평균 부하량은 BOD 1259.8kg/d, T-P 39.2kg/d로 산정되었다. 조건2에 대한 BOD 부하량의 회귀식은 7번 회귀식으로 모의 된 평균 부하량은 1258.9kg/d이고 T-P 부하량의 회귀식은 6번 회귀식으로 모의 된 평균 부하량은 39.2kg/d로 산정되었다. BOD, T-P 실측부하량과 모의 된 평균 부하량은 비슷한 결과로 나타났고, 최대실측부하량의 과소 평가된 결과를 보였다.



평동천의 조건1, 조건2에 대한 BOD 부하량의 회귀식은 9번 회귀식으로 평균 부하량은 BOD 192.0kg/d로 나타났다. BOD 실측부하량(평균)은 모의 된 평균 부하량이 비슷한 결과를 보였고, 최대실측부하량의 모의 된 부하량도 큰 차이가 나지 않는 결과를 보였다. T-P 부하량의 회귀식은 선정은 조건1은 9번 회귀식으로 12.2kg/d 이고 조건2는 8번 회귀식으로 12.1kg/d 나타났으며, 실측부하량(평균)과 모의 된 평균 부하량은 비슷한 결과를 보였지만, 최대실측부하량은 과소 평가된 결과를 보였다.

지석천4의 조건1과 조건2에 대한 BOD, T-P 부하량의 회귀식은 9번 회귀식으로 선정되었다. 회귀식에 의해 모의 된 평균 부하량은 각각 BOD 2833.2kg/d, T-P 60.3kg/d로 나타났다. BOD 실측부하량(평균)보다 크게 모의 된 결과로 대부분 실측값은 과대 평가되었다. T-P 실측부하량(평균)과 모의 된 평균 부하량은 비슷한 결과를 나타냈지만, 최대실측부하량이 과소 평가되는 결과를 보였다.

**표 4.2 LOADEST 부하량 산정결과(최소, 최대, 평균)**

부하량		BOD(kg/d)			T-P(kg/d)		
		실측	LOADEST (9번)	LOADEST (0번)	실측	LOADEST (9번)	LOADEST (0번)
광주천2	최소	27.9	57.4	57.4	1.3	1.4	1.4
	최대	8496.2	6005.8	6005.8	696.6	689.9	689.9
	평균	509.6	492.6	492.6	23.5	22.4	22.4
풍영정천	최소	46.4	60.3	60.6	1.4	1.9	1.9
	최대	15444.8	28131.0	28182.0	1432.2	2119.9	2123.7
	평균	463.2	512.4	512.7	24.4	28.3	28.3
황룡강 3-1	최소	191.7	261.2	254.5	5.8	9.6	9.8
	최대	7355.4	3937.3	3925.8	765.0	149.8	148.1
	평균	1268.0	1259.8	1258.9	41.4	39.2	39.2
평동천	최소	5.9	8.3	8.3	0.7	1.1	1.1
	최대	3315.0	3643.4	3643.4	636.3	248.2	246.8
	평균	196.4	192.0	192.0	13.7	12.2	12.1
지석천4	최소	49.2	60.4	60.4	4.9	6.5	6.5
	최대	10941.1	5606.0	5606.0	492.3	328.6	328.6
	평균	1079.8	2833.2	2833.2	60.9	60.3	60.3

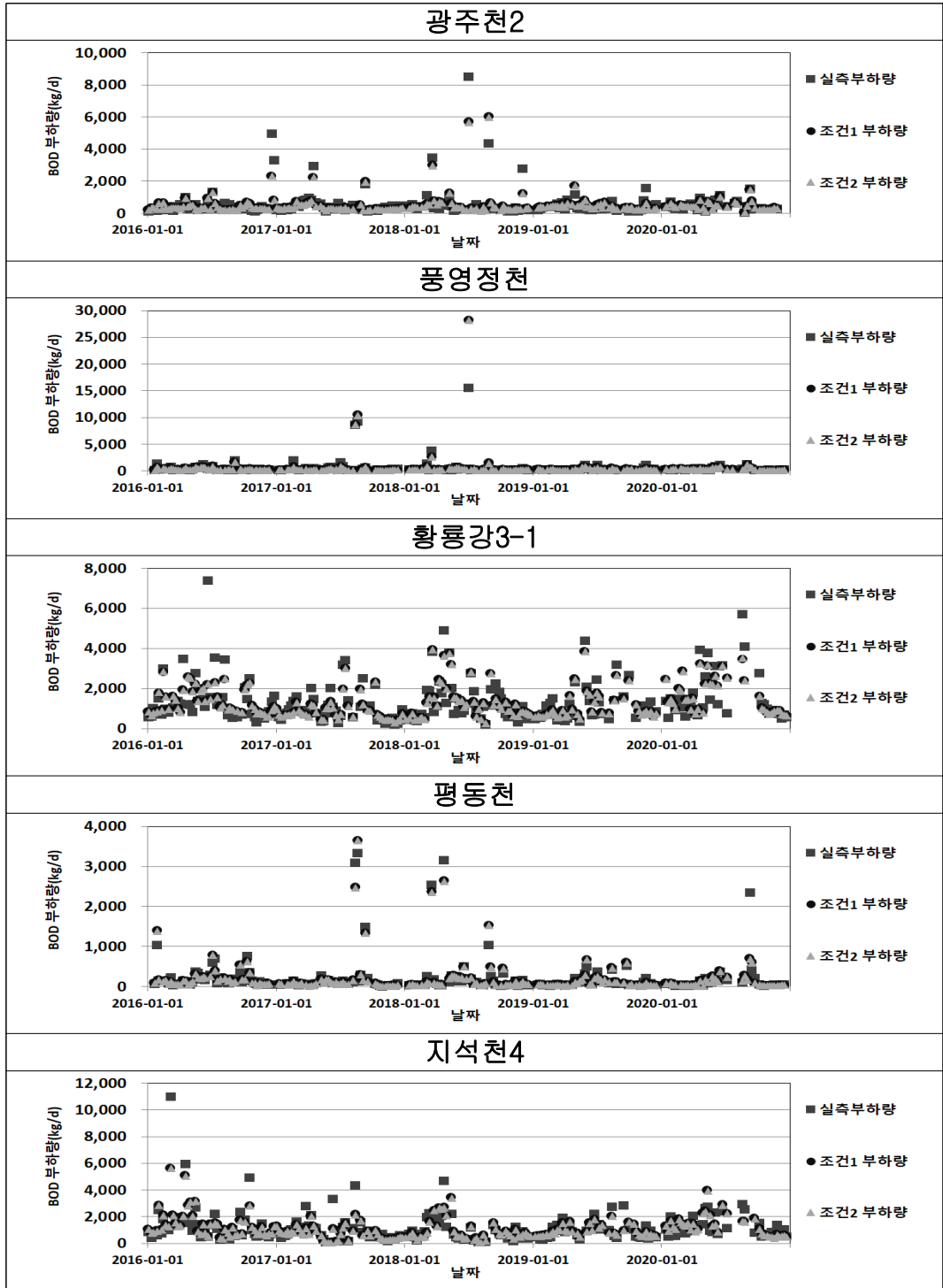


그림 4.1 LOADEST 모의 조건1, 조건2에 따른 BOD 부하량 산정결과

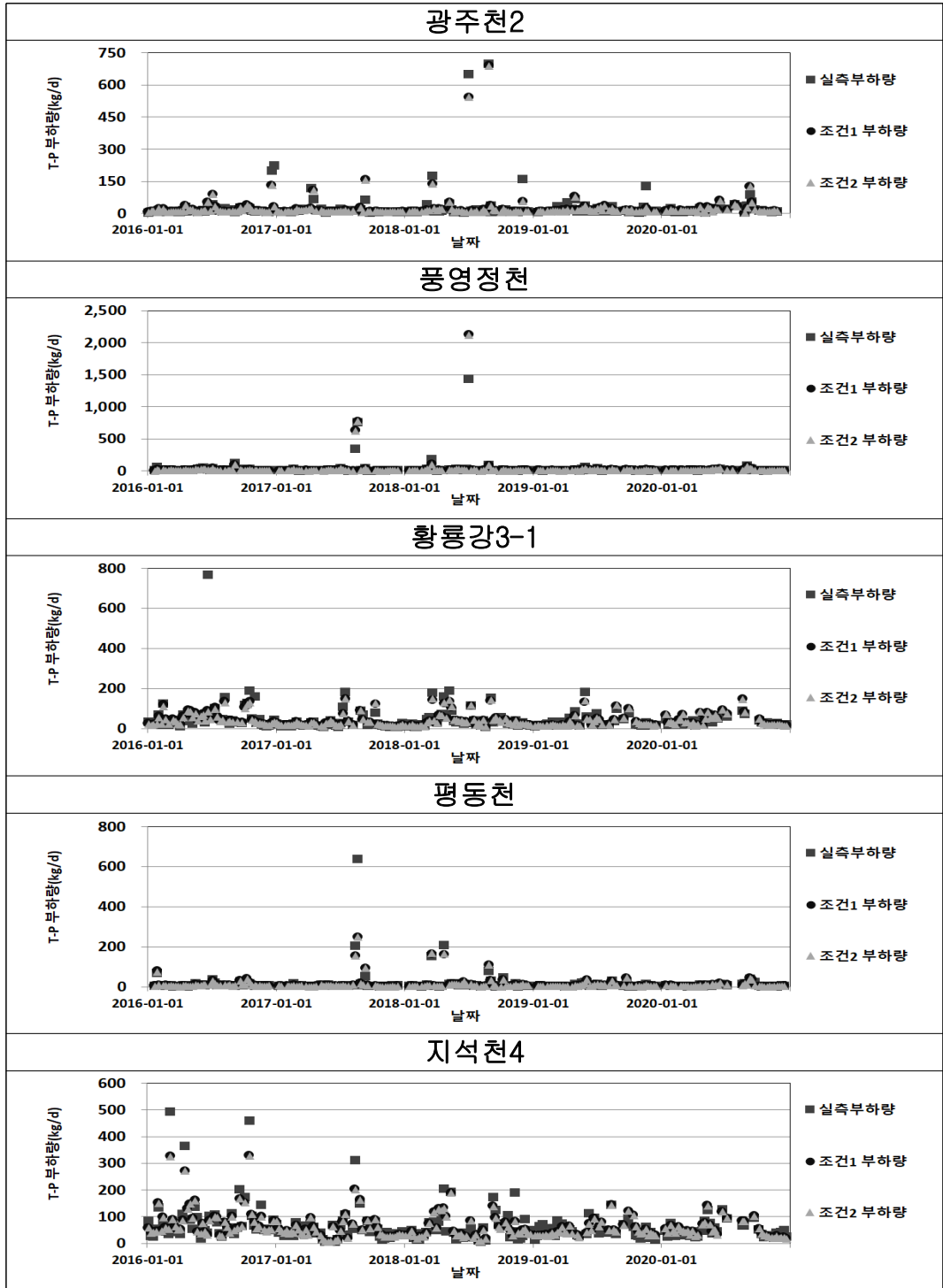


그림 4.2 LOADEST 모의 조건1, 조건2에 따른 T-P 부하량 산정결과

## 4.2 지점별 LOADEST 모형의 회귀분석

LOADEST 모형에 의해 산정된 부하량의 적합성을 평가하였다. 모의 값과 실측값을 비교 및 평가하였으며, 산포도로 나타내었다.

지점별 BOD, T-P 부하량은 9번 회귀식과 0번(자동 선택)을 적용하였다. 0번(자동 선택)의 LOADEST 회귀식은 지점의 특성에 따라 각각 6번, 7번, 8번, 9번 회귀식으로 선정되어 모의 되었다. LOADEST 모형의 회귀모형에 모의 값은 통계적 방법을 통하여 평가하였다.

평가 방법은 결정계수(coefficients of determination,  $R^2$ ), NSE(Nash Sutcliffe Efficiency), RSR(Root mean Square error-observation standard deviation Ratio), PBIAS(Percent BIAS)를 사용하였다.

결정계수( $R^2$ )는 실측값과 모의 값의 유사성을 평가하는 지표로, 0 ~ 1의 범위에서, 모의 값이 실측값의 경향성은 유사할수록 1에 근접한 수치로 나타난다. 그러나 실측값과 모의 값이 큰 차이가 나도 경향성만 반영해 높은 모의 값만 나타내는 단점이 있다. 식(1)은  $R^2$ 를 정의하는 식이다.

NSE(Nash-Sutcliffe-Efficiency)는 1970년 Nash와 Sutcliffe에 의해 제안된 식으로  $-\infty \sim 1$ 의 범위에 있으며, 1에 가까울수록 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타내며, 일반적으로 0 ~ 1의 사이의 값일 때 모형의 적용성이 있는 것으로 나타난다. 식(2)은 NSE를 정의하는 식이다.

PBIAS는 실측값 대비 모의 값의 과대 또는 과소 추정의 경향성을 의미하며, 0일 때 최적의 값이며, 값이 낮을수록 모형의 모의가 정확함을 의미한다. PBIAS는 식(3)과 같다.

RSR은 2004년 Singh 등에 의해 제안된 식으로 RMSE(Root Mean Square Error)가 갖는 한계를 극복하기 위해 제안된 식이다. RMSE는 실측치와 결과치의 정량적 차이를 알 수 있으나, 오차의 정도를 파악하는 데 한계가 있다. 이를 표준화하여 나타내는 것이 필요하다. RSR은 이러한 RMSE를 표준화한 것이고 RMSE와 실측값의 표준편차 간의 비를 의미한다. RSR의 값이 0이면 모의 값이 실측값을 완벽하게 모의한 것이며, 값이 낮을수록 잘 모의 된 것으로 판단 할 수 있으며, RSR은 식(4)과 같이 정의된다. 위의 통계적 변량에 대한 모형의 적합성은 표 4.3의 Moriasi et al.,(2007)가 제안한 월 단위 모의 기준을 사용하였다. 일반적으로 월 단위보다

일 단위 모의 값이 실측값을 잘 반영하지 못하므로 본 연구에서는 좀 더 낮은 통계적 변량에서도 적용 가능할 것으로 판단된다.

$$R^2 = \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

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

$$PBIAS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2 \times 100}{\sum Q_{obs}} \quad (3)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV} = 1 - \frac{\sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sqrt{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (4)$$

여기서,  $Q_{OBS}$ 는 관측자료,  $Q_{cal}$ 는 예측자료,  $\overline{Q_{cal}}$ 는 관측자료의 평균값이다.

**표 4.3 일반적인 통계적 등급(월 단위 모의 기준) (Moriasi et al., 2007)**

등급	NSE			PBIAS(%)			RSR		
	0.75<	NSE	≤ 1.0	± 10 ≤	PBIAS	< ± 10	0.00<	RSR	≤ 0.5
VERY GOOD	0.75<	NSE	≤ 1.0	± 10 ≤	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	> 0.70

### 4.2.1 BOD 부하량 회귀식 분석 결과

지점별 실측부하량과 LOADEST 조건1과 조건2의 모의 부하량의 통계적 회귀분석 결과를 표 4.5에 나타내었고, 실측부하량과 조건1(9번 회귀식), 조건2(0번(자동선택))에 관한 모의 부하량의 산포도를 그림 4.3 ~ 그림 4.7로 표현하였다.

광주천2의 BOD 모의 결과 조건1(9번 회귀식)일 때 NSE는 0.77, PBIAS는 3.35, RSR는 0.63으로 모든 등급이 GOOD 이상으로 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 조건2(0번(자동 선택))일 때는 9번 회귀식으로 선정되어 분석 결과는 조건1과 동일하게 나타났다. 모의 값과 실측값을 비교한 결과 모의 값은 실측값보다 과소 평가되었지만, 최대 실측값을 제외한 실측값은 모의 값은 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다.

풍영정천은 조건1(9번 회귀식)일 모의 값의 적용성을 평가한 결과 NSE는 0.58, PBIAS는 -10.40, RSR는 0.42으로 평가되었다. 조건2(0번(자동선택))일 때는 회귀식이 8번으로 선정되었으며, 적용성 평가는 NSE는 0.57, PBIAS는 -10.40, RSR는 0.42로 평가되었다. PBIAS는 -10.40로 실측값보다 모의 값이 큰 결과를 보였으며, 모의 값은 실측값보다 과대 평가되었다. 9번 회귀식, 8번 회귀식의 모의 값과 추세선은 비슷하게 나타났다.

황룡강3-1은 9번 회귀식일 때 NSE는 0.63, PBIAS는 0.71, RSR는 0.80으로 평가되었다. 조건2(0번(자동선택))일 때 8번 회귀식으로 선정되었으며 분석 결과 NSE는 0.63, PBIAS는 0.71, RSR는 0.80으로 평가되었다. 9번 회귀식과 8번 회귀식에 따른 실측값과 모의 값의 RSR는 0.80로 UNSATISFACTORY으로 표준편차가 차이가 큰 결과를 보였고, 모의 값은 실측값에 비해 최대값은 과소 평가되었다.

평동천의 BOD 모의 결과는 9번 회귀식일 때 NSE는 0.90, PBIAS는 2.00, RSR는 0.35으로 모든 등급이 VERY GOOD으로 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 결과를 보였다. 조건2(0번(자동선택))는 9번 회귀식으로 선정되어 분석 결과는 동일하게 나타났다. BOD 산포도에서 0번 회귀식 추세선 경향은 실측값에 가장 근접한 결과를 보였다. RSR는 0.35로 모의 값과 실측값의 부하량 차이는 적었지만, 평균 부하량 이상의 실측값에서는 과소 평가되는 경향을 보였다.

지석천4의 BOD 모의 결과는 9번 회귀식일 때 NSE는 0.65, PBIAS는 0.82, RSR는 0.80으로 평가되었다. 조건2(0번(자동선택))일 때는 9번 회귀식으로 선정되어 분석

결과는 동일하게 나타났다. 모의 값과 실측값을 비교한 결과 분포 수준은 평균 부하량 이하에서는 부하량 차이는 적었지만, 최대 실측부하량의 모의 값은 과소 평가되는 결과를 보였다.

**표 4.4 BOD 부하량의 회귀식 검정 결과**

지점	조건	번호	NSE		PBIAS(%)		RSR	
광주천2	1	9	0.77	VERY	3.35	VERY	0.63	GOOD
	2	0(9)		GOOD		GOOD		
풍영정천	1	9	0.58	SATIS	-10.40	GOOD	0.42	VERY
	2	0(8)	0.57	FACTORY				
황룡강 3-1	1	9	0.63	SATIS	0.71	VERY	0.80	UNSATIS
	2	0(7)	0.63	FACTORY		GOOD		FACTORY
평동천	1	9	0.90	VERY	2.00	VERY	0.35	VERY
	2	0(9)		GOOD		GOOD		GOOD
지석천4	1	9	0.65	SATIS	0.82	VERY	0.80	UNSATIS
	2	0(9)		FACTORY		GOOD		FACTORY

#### 4.2.2 T-P 부하량 회귀식 분석 결과

광주천2 T-P 모의 결과는 조건1(9번 회귀식)일 때 NSE는 0.90, PBIAS는 4.76, RSR는 0.36으로 모든 등급이 VERY GOOD 이상으로 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 조건2(0번(자동선택))일때는 9번 회귀식을 선정하여 분석 결과가 동일하게 나타났다. T-P 산포도에서 9번 회귀식 추세선은 실측값과 차이가 크지 않는 경향을 보여준다. 모의 값과 실측값을 비교한 결과 모의 값은 실측값보다 과소 평가되었으나, RSR는 0.36로 편차가 적은 결과를 보였으며 부하량 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다.

풍영정천 조건1(9번 회귀식)일 때 NSE는 0.79, PBIAS는 -15.88, RSR는 0.32으로 평가되었다. 조건2(0번(자동선택))일때는 8번 회귀식으로 선정되었으며, NSE는 0.79, PBIAS는 -15.88, RSR는 0.32를 나타내었다. PBIAS는 SATISFACTORY로 만족 등급이었지만, 최대 실측값에서 모의 값이 과대 평가되어 추세선 경향은 큰 차이를 보였다. RSR는 0.32로 실측값과 모의 값의 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다.

황룡강3-1은 조건1(9번 회귀식)일 때 NSE는 0.36, PBIAS는 5.22, RSR는 1.53으로 평가되었다. 모의 값과 실측값의 NSE와 RSR은 UNSATISFACTORY이지만, 최대 실측값을 제외한 실측값은 모의 값과의 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다. T-P 산포도에서 9번 회귀식과 6번 회귀식의 모의 값과 추세선은 비슷하게 나타났다.

평동천의 T-P 모의 결과는 조건1(9번 회귀식)일 때 NSE는 0.68, PBIAS는 11.21, RSR는 1.01으로 평가되었고, 조건2(0번(자동선택))일때는 8번 회귀식으로 NSE는 0.68, PBIAS는 11.21, RSR는 1.01으로 평가되었다. NSE가 GOOD등급으로 모의 값은 실측값을 잘 반영하는 결과를 보였다. 최대 실측값에서 모의 값은 과소평가되었고, 실측값과 모의 값의 편차도 큰 결과를 보였다. T-P 산포도에서 9번과 8번 회귀식 추세선은 비슷하게 나타났지만, 실측값과 경향 차이는 큰 차이를 보였다.

지석천4의 T-P 모의 결과 조건1(9번 회귀식)일 때 NSE는 0.82, PBIAS는 1.04, RSR는 0.56으로 모든 등급이 GOOD 이상으로 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 조건2(0번(자동선택))일때는 9번 회귀식으로 선정되어 분석 결과는 동일하게 나타났다. 모의 값과 실측값을 비교한 결과 모의 값은 실측값보다 과소평가되었지만, 최대 실측값을 제외한 실측값은 모의 값과 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다.

**표 4.5 T-P 부하량의 회귀식 검정 결과**

지점	조건	번호	NSE		PBIAS(%)		RSR	
광주천2	1	9	0.90	VERY	4.76	VERY	0.36	VERY
	2	0(9)		GOOD		GOOD		GOOD
풍영정천	1	9	0.79	VERY	-15.88	SATIS	0.32	VERY
	2	0(8)	0.79	GOOD		FACTORY		GOOD
황룡강 3-1	1	9	0.36	UNSATIS	5.22	VERY	1.53	UNSATIS
	2	0(6)	0.36	FACTORY		GOOD		FACTORY
평동천	1	9	0.68	GOOD	11.21	GOOD	1.01	UNSATIS
	2	0(8)	0.68					FACTORY
지석천4	1	9	0.82	VERY	1.04	VERY	0.56	GOOD
	2	0(9)		GOOD		GOOD		



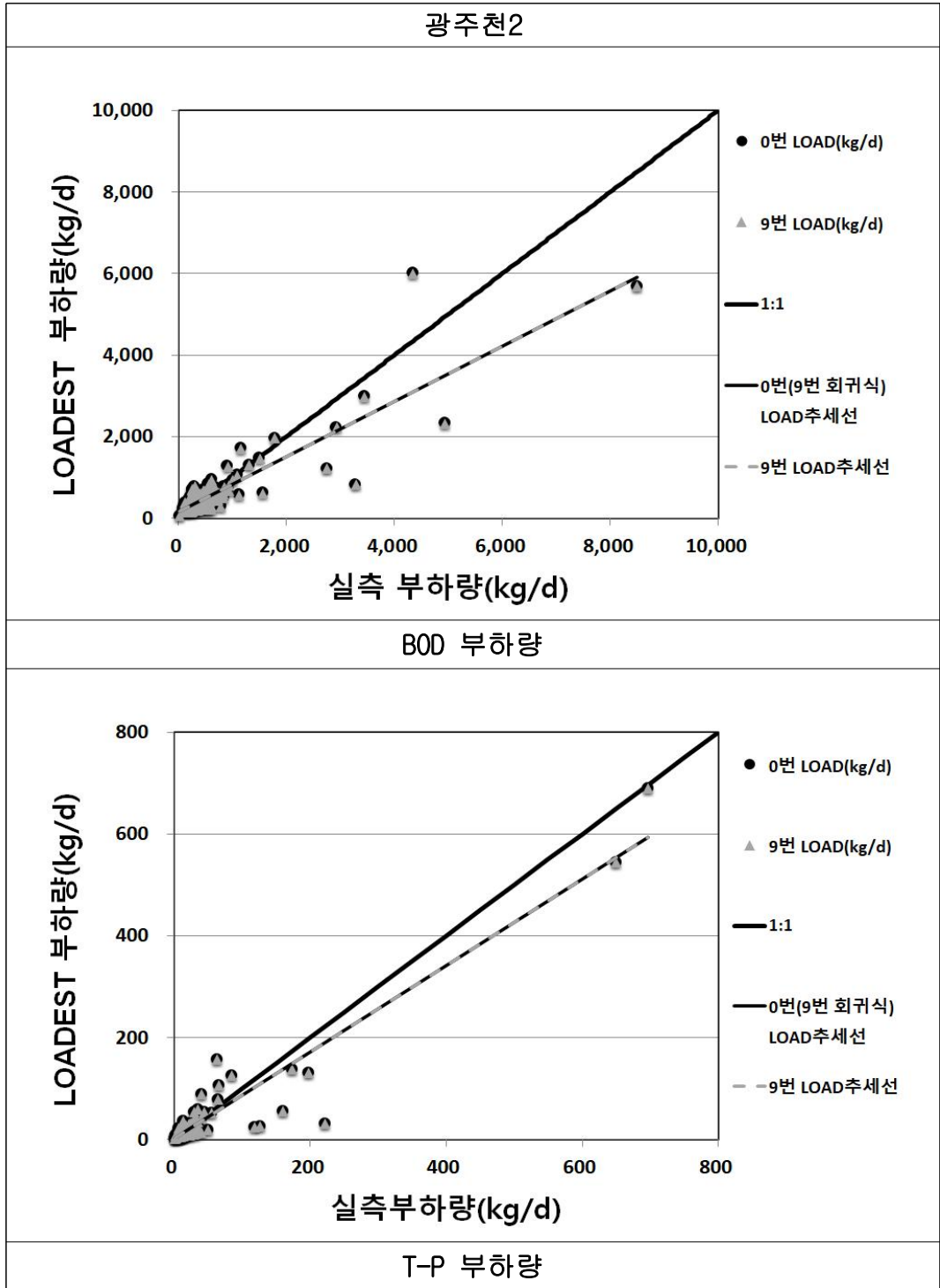


그림 4.3 BOD, T-P에 대한 부하량 산포도

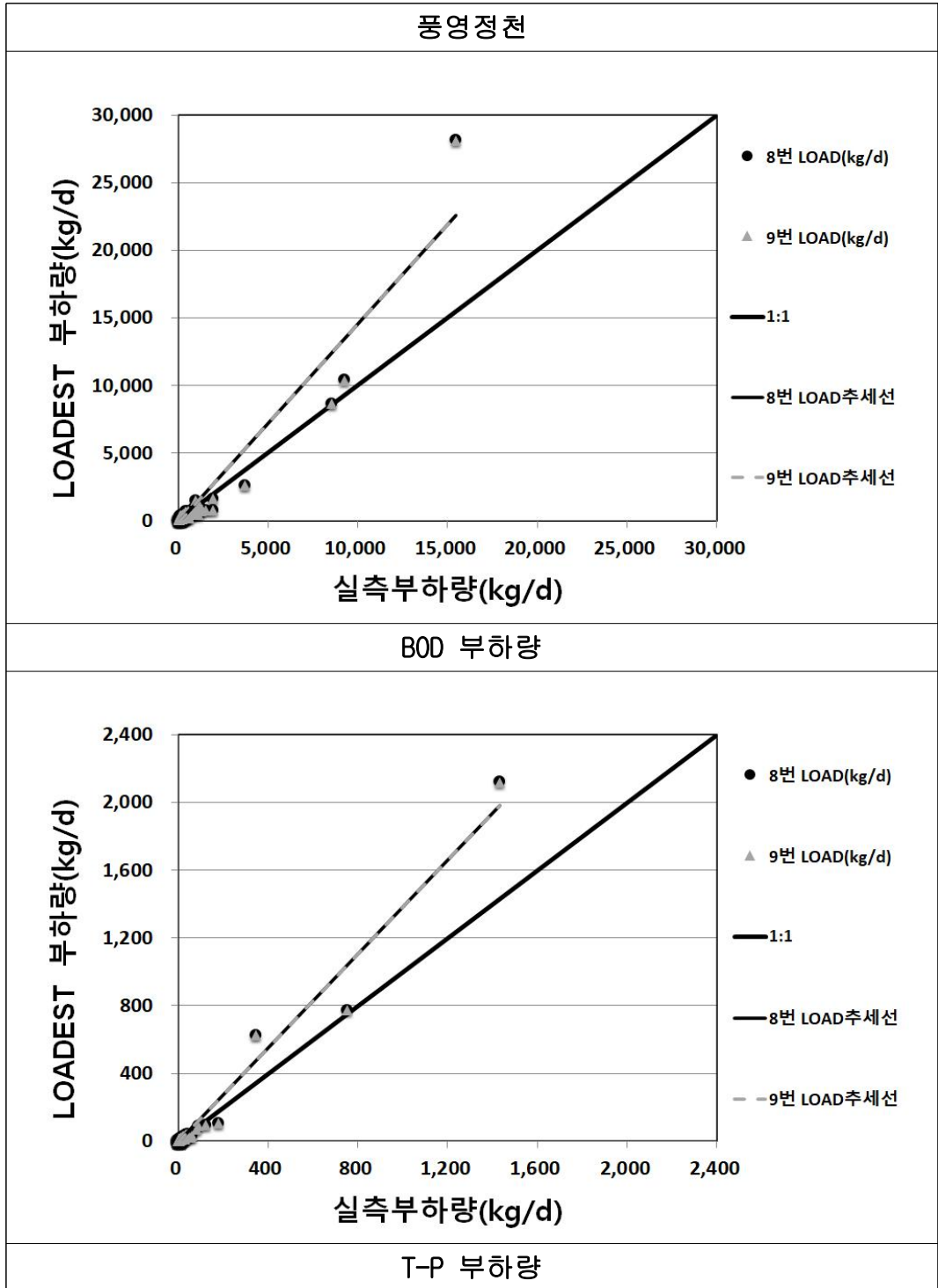


그림 4.4 BOD, T-P에 대한 부하량 산포도

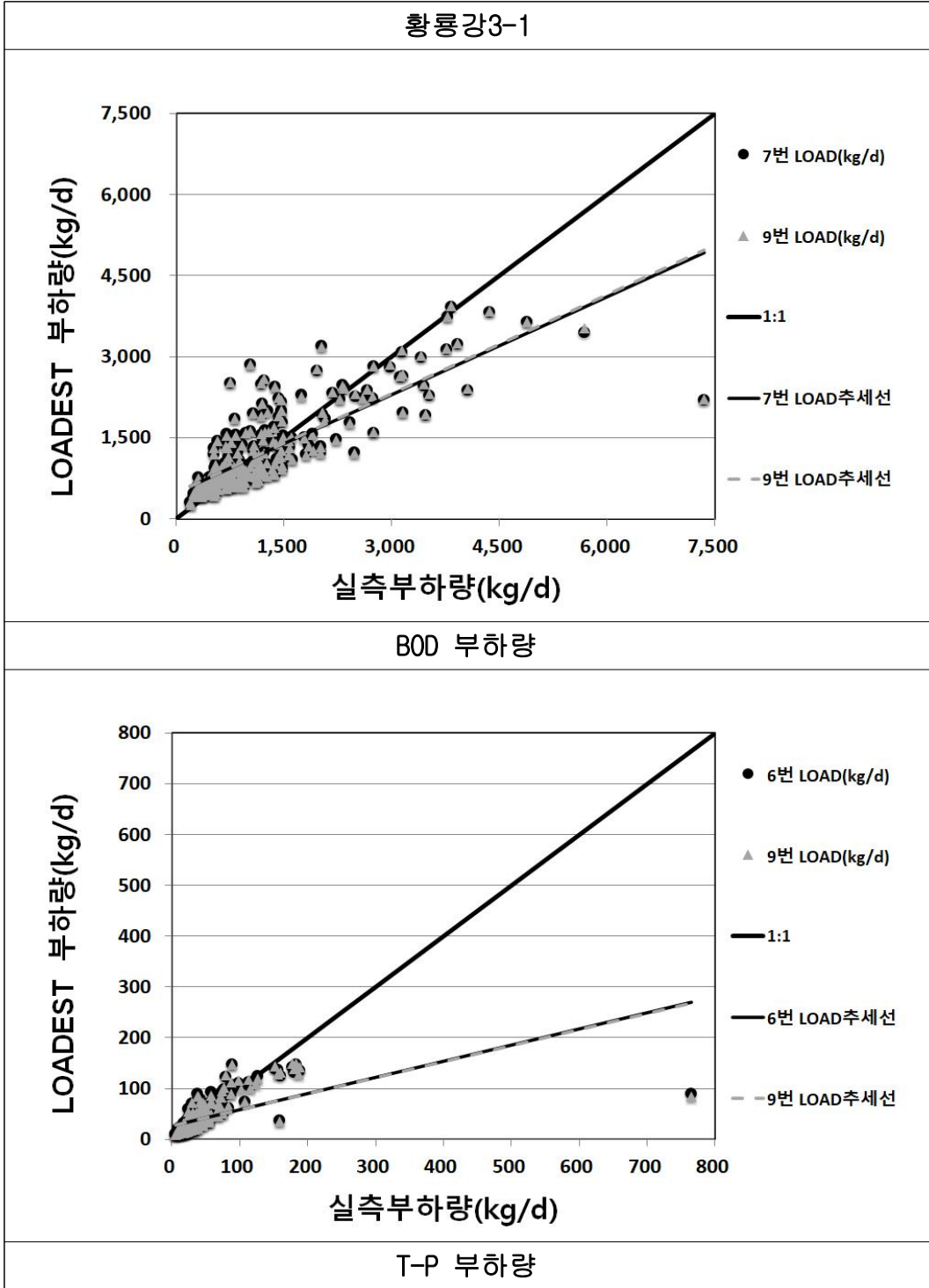


그림 4.5 BOD, T-P에 대한 부하량 산포도

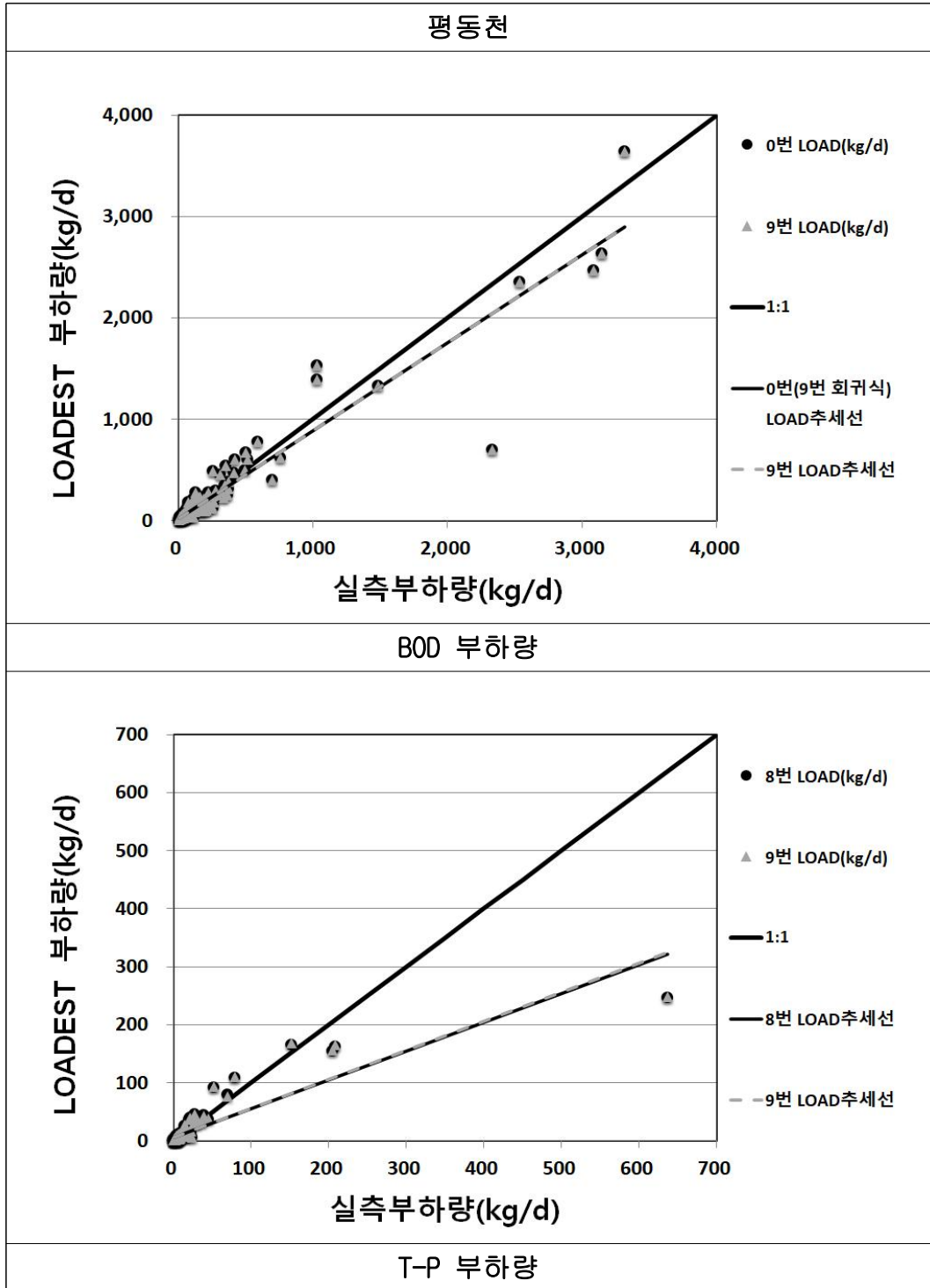


그림 4.6 BOD, T-P에 대한 부하량 산포도

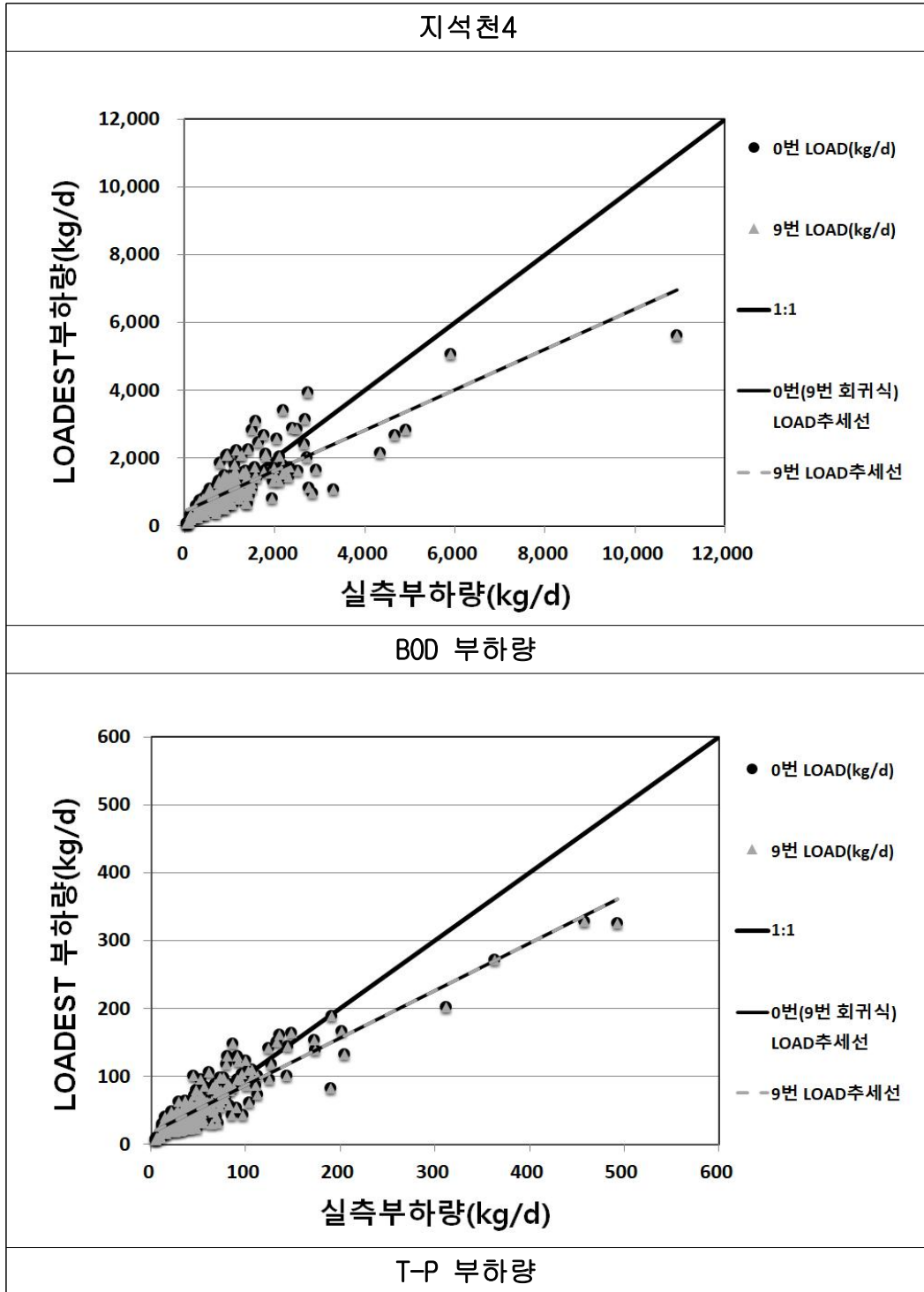


그림 4.7 BOD, T-P에 대한 부하량 산포도

### 4.3 지점별 매개변수 분석

대상 하천에 적용된 LOADEST 조건1과 조건2의 회귀식 매개변수에 따른 수질의 경향을 분석하였다. 표 4.6부터 표 4.10은 지점별 LOADEST 회귀식 매개변수에 따른 변수값, P-value, 편차로 나타내었다. 회귀식의 P-value는 LOADEST 모형에서 F-검정의 귀무가설이 기각되었을 때 T-검정을 통해  $\beta_1 = 0$ 에 대한 귀무가설을 분석한 값이다. P-value가 0.01(1% 유의수준)보다 작으면 매우 유의수준, 0.01과 0.1(1~10% 유의수준)에 있으면 보통 유의 그리고 0.1(10% 유의수준)보다 크면 유의하지 않은 것으로 판정하였다. (Helsel, D.R., and Hirsch R.M., 2002) 본 연구에서는 회귀식 적용에 따른 유의성은 LOADEST 모형 회귀식 계수의 P-value로 유의성을 평가하였다.

#### (1) 광주천2

광주천2는 BOD에 대한 LOADEST 조건1(9번 회귀식)과 조건2(0번(자동선택))에 적용된 회귀식이 동일하며, 매개변수  $a_0 \sim a_6$ 에 대한 P-value는  $a_4$ 가 0.03으로 0.01보다 크게 분석되어 유의수준은 보통으로 나타났다.  $a_4$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. T-P에 대한 매개변수  $a_0 \sim a_6$ 에 대한 P-value는  $a_3, a_6$ 가 0.01보다 크게 분석되어 유의수준은 보통으로 나타났다.  $a_3, a_6$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다.

회귀식의 매개변수를 분석한 결과 BOD, T-P 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin 주기와 부(-)의 관계인 것으로 분석되었다. 연중시간(Dtime)에 대한 연관성은 적은 것으로 나타났다. 광주천2의 BOD와 T-P는 시간 흐름에 따라 수질개선이 적은 것으로 분석되었다.

표 4.6 광주천2 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증

지점	매개변수	BOD (9번 회귀식)			BOD (9번 회귀식)				
		변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev		
광주천2	a0	조건 1	6.18	3.56E-203	0.05	조건 2	6.18	3.56E-203	0.05
	a1		0.88	1.66E-45	0.05		0.88	1.66E-45	0.05
	a2		0.10	4.37E-03	0.03		0.10	4.37E-03	0.03
	a3		-0.33	1.28E-12	0.04		-0.33	1.28E-12	0.04

a4		0.09	3.61E-02	0.04		0.09	3.61E-02	0.04
a5		0.06	3.57E-03	0.02		0.06	3.57E-03	0.02
a6		-0.05	2.76E-03	0.02		-0.05	2.76E-03	0.02
매개변수	T-P (9번 회귀식)				T-P (9번 회귀식)			
		변수값	P-value	std.dev		변수값	P-value	std.dev
a0	조건 1	2.83	4.22E-131	0.05	조건 2	2.83	4.22E-131	0.05
a1		1.20	2.47E-66	0.05		1.20	2.47E-66	0.05
a2		0.12	3.55E-04	0.03		0.12	3.55E-04	0.03
a3		-0.10	2.93E-02	0.04		-0.10	2.93E-02	0.04
a4		0.12	7.23E-03	0.04		0.12	7.23E-03	0.04
a5		0.08	1.85E-04	0.02		0.08	1.85E-04	0.02
a6		-0.03	7.79E-02	0.02		-0.03	7.79E-02	0.02

## (2) 풍영정천

풍영정천은 BOD에 대한 LOADEST 조건1(9번 회귀식)에서 매개변수  $a_0 \sim a_6$ 에 대한 P-value는  $a_4, a_6$ 는 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 나타났다.  $a_4, a_6$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 조건2(0번(자동선택))에서는 8번 회귀식으로 선정되었으며, 매개변수  $a_0 \sim a_5$ 에 대한 P-value는  $a_4$ 은 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 나타났다.  $a_4$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다.

T-P에 대한 조건1(9번 회귀식)에서 매개변수  $a_0 \sim a_6$ 에 대한 P-value는  $a_6$ 가 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 나타났다.  $a_6$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 나타났다. 조건2(0번(자동선택))에서는 8번 회귀식으로 선정되었으며 매개변수  $a_0 \sim a_5$ 에 대한 P-value는 0.01보다 작게 분석되어 매우 유의하는 것으로 분석되었다.

회귀식의 매개변수를 분석한 결과 BOD, T-P의 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin 주기와 부(-)의 관계인 것으로 분석되었고, P-value도 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 연중시간(Dtime)에 대한 P-value는 0.01보다 적게 분석되어 매우 유의하고 9번 회귀식일때는  $a_6$  매개변수 값은 0이고 P-value는 유의하지 않음으로 불필요한 매개변수로 나타났다. 조건 2(0번(자동선택))으로  $a_6$  매개변수가 없는 8번 회귀식 선택되는 결과로  $a_5$ 의 매개변수는 다른 변수와의 상관관계의 부정적인 영향이 적은 것으로 나타났다.

표 4.7 풍영정천 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증

지점	매개변수	BOD (9변 회귀식)			BOD (8변 회귀식)				
		변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev		
풍영정천	조건 1	a0	5.96	3.95E-198	0.05	조건 2	5.97	1.72E-223	0.04
		a1	1.07	5.15E-77	0.04		1.07	4.01E-77	0.04
		a2	0.07	7.03E-04	0.02		0.07	7.23E-04	0.02
		a3	-0.33	6.90E-17	0.04		-0.33	6.48E-17	0.04
		a4	0.04	3.17E-01	0.04		0.04	3.24E-01	0.04
		a5	0.07	2.57E-04	0.02		0.07	2.50E-04	0.02
		a6	0.00	7.81E-01	0.01		-	-	-
	매개변수	조건 1	T-P (9변 회귀식)			T-P (8변 회귀식)			
			변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev	
			a0	2.78	4.77E-144	0.04	2.79	6.60E-169	0.03
			a1	1.20	3.50E-99	0.03	1.20	2.73E-99	0.03
			a2	0.08	1.40E-05	0.02	0.08	1.43E-05	0.02
			a3	-0.15	4.30E-06	0.03	-0.15	4.12E-06	0.03
			a4	0.13	1.26E-04	0.03	0.13	1.32E-04	0.03
a5			0.09	1.47E-08	0.02	0.09	1.40E-08	0.02	
a6	0.00	7.47E-01	0.01	-	-	-			

### (3) 황룡강3-1

황룡강3-1은 BOD에 대한 LOADEST 조건1(9변 회귀식)에서 매개변수  $a_0 \sim a_6$ 에 대한 P-value는  $a_2, a_6$ 은 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 나타났다.  $a_2, a_6$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 조건2(0변(자동선택))에서는 7변 회귀식으로 선정되었으며 매개변수  $a_0 \sim a_4$ 에 대한 P-value는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 회귀식의 매개변수를 분석한 결과 BOD 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin 주기와 부(-)의 관계인 것으로 분석되었다. 연중시간(Dtime)에 대한 연관성 9변 회귀식과 7변 회귀식은 연관성은 적은 것으로 나타났다.

T-P에 대한 LOADEST 조건1(9변 회귀식)에서 매개변수  $a_0 \sim a_6$ 에 대한 P-value는  $a_3, a_5, a_6$ 은 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 나타났다.  $a_3, a_5, a_6$ 를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 조건2(0변(자동선택))에서는 6변 회귀식으로 선정되었으며 매개변수  $a_3$ 을 제외한 매개변수의 P-value는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다.



T-P 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin 주기와 부(-)의 관계인 것으로 분석되었다. 9번 회귀식에 연중시간(Dtime), (Dtime<sup>2</sup>)에 대한 P-value는 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않음으로 수질의 개선이 적은 것으로 분석되었다. 조건2(0번(자동선택))는 6번 회귀식으로 연중시간(Dtime) 매개변수가 사용되지 않았다.

**표 4.8 황룡강3-1 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증**

지점	매개변수	BOD (9번 회귀식)			BOD (7번 회귀식)				
		변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev		
황룡강 3-1	a0	조건 1	6.93	4.89E-224	0.05	조건 2	6.94	6.49E-282	0.03
	a1		0.80	5.57E-48	0.04		0.80	6.36E-51	0.04
	a2		0.01	7.70E-01	0.05		-0.21	1.67E-07	0.04
	a3		-0.20	2.59E-07	0.04		0.15	9.28E-05	0.04
	a4		0.15	1.19E-04	0.04		0.08	1.14E-05	0.02
	a5		0.08	1.19E-05	0.02		-	-	-
	a6		0.00	7.93E-01	0.01		-	-	-
	매개변수	T-P (9번 회귀식)			T-P (6번 회귀식)				
	a0	조건 1	3.38	2.89E-163	0.04	조건 2	3.34	1.69E-192	0.03
	a1		0.96	4.93E-64	0.04		0.94	1.27E-65	0.04
	a2		0.15	7.68E-04	0.04		0.16	3.42E-04	0.04
	a3		-0.04	2.99E-01	0.04		-0.03	4.54E-01	0.04
	a4		0.11	2.15E-03	0.04		0.11	1.21E-03	0.04
	a5		0.02	1.94E-01	0.02		-	-	-
a6	-0.02		2.04E-01	0.01	-		-	-	

**(4) 평동천**

평동천은 BOD에 대한 LOADEST 조건1(9번 회귀식)과 조건2(0번(자동선택))에 적용된 회귀식이 동일하며 매개변수 a<sub>0</sub> ~ a<sub>6</sub>에 대한 P-value는 a<sub>2</sub> 0.04로 유의수준은 보통으로 나타났다. a<sub>5</sub>는 0.9로 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 분석되었다. a<sub>2</sub>, a<sub>5</sub>를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. T-P는 조건1(9번 회귀식)대한 매개변수 a<sub>0</sub> ~ a<sub>6</sub>에 대한 P-value는 a<sub>6</sub>가 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않는 것으로 나타났다. a<sub>6</sub>를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 조건2(0번(자동선택))은 8번 회귀식으로 a<sub>0</sub> ~ a<sub>5</sub>에 대한 P-value는 0.01보다 작게 분석되어 매우 유의한 것으로 분석되었

다. BOD 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin 주기와 부(-) 관계인 것으로 분석되었다. BOD 수질 변화에 대해 연중시간(Dtime)의 변수값은 매우 적고 P-value는 0.9로 유의하지 않는 결과를 보여 수질개선 효과는 적은 것으로 분석되었다. T-P 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin주기와 Cos주기가 부(-) 관계로 변화가 적은 것으로 나타났다. 연중 시간(Dtime)에 대한 연관성은 적은 것으로 나타났다.

**표 4.9 평동천 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증**

지점	매개변수	BOD (9번 회귀식)			BOD (9번 회귀식)				
		변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev		
평동천	a0	조건 1	4.73	3.84E-189	0.04	조건 2	4.73	3.84E-189	0.04
	a1		1.10	1.27E-95	0.03		1.10	1.27E-95	0.03
	a2		0.04	4.34E-02	0.02		0.04	4.34E-02	0.02
	a3		-0.21	1.37E-08	0.04		-0.21	1.37E-08	0.04
	a4		0.09	2.09E-08	0.04		0.09	2.09E-08	0.04
	a5		0.0004	9.81E-01	0.02		0.0004	9.81E-01	0.02
	a6		0.04	6.03E-04	0.01		0.04	6.03E-04	0.01
	매개변수	T-P (9번 회귀식)			T-P (8번 회귀식)				
	a0	조건 1	2.13	5.78E-126	0.04	조건 2	2.11	2.16E-147	0.03
	a1		1.02	1.06E-96	0.03		1.02	1.90E-96	0.03
	a2		0.07	1.22E-05	0.02		0.08	8.52E-06	0.02
	a3		-0.14	1.40E-05	0.03		-0.14	1.67E-05	0.03
	a4		-0.18	2.09E-06	0.04		-0.17	3.00E-06	0.04
	a5		0.06	4.45E-04	0.02		0.06	4.79E-04	0.02
a6	-0.01		2.61E-01	0.01	-		-	-	

**(5) 지식천4**

지식천4는 BOD에 대한 LOADEST 조건1(9번 회귀식)과 조건2(0번(자동선택))에 적용된 회귀식이 동일하며 매개변수 a<sub>0</sub> ~ a<sub>6</sub>에 대한 P-value는 a<sub>2</sub>, a<sub>6</sub>은 0.01보다 크게 분석되어 유의수준은 보통으로 나타났다. a<sub>2</sub>, a<sub>6</sub>를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. T-P에 대한 매개변수 a<sub>0</sub> ~ a<sub>6</sub>에 대한 P-value는 a<sub>3</sub>, a<sub>5</sub>가 0.01보다 크게 분석되어 유의수준으로 보통이고 a<sub>2</sub>는 0.2로 0.1보다 크게 분석되어 유의하지 않은 것으로 나타났다. a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>5</sub>를 제외한 매개변수는 0.01보다 작아 매우 유의한 것으로 분석되었다. 회귀식의 매개변수를 분석

한 결과 BOD 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화와의 관련성은 Sin 주기와 부(-)의 관계인 것으로 분석되었다. 연중시간(Dtime)에 대한 연관성은 적은 것으로 나타났다.  $a_5$ ,  $a_6$ 의 변수값이 양수로 시간 흐름에 부하량이 증가하는 관계로 수질의 변화는 적은 것으로 분석되었다.

T-P 경향성은 유량과 관련성이 높고, 계절적인 변화의 관련성은 Sin 주기와 Cos 주기가 부(+) 관계인 것으로 분석되었다. 연중시간(Dtime)에 관한 P-value는 0.01 이상으로 유의수준은 보통이지만  $a_5$ ,  $a_6$ 의 변수값이 음수로 수질의 개선 효과가 있는 것으로 나타났다.

표 4.10 지식천4 LOADEST 회귀식의 매개변수 및 유의성 검증

지점	매개변수	BOD (9변 회귀식)			BOD (9변 회귀식)					
		변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev			
지식천4	a0	조건 1	6.44	1.75E-228	0.04	조건 2	6.44	1.75E-228	0.04	
	a1		0.87	2.51E-69	0.03		0.87	2.51E-69	0.03	
	a2		-0.05	3.04E-02	0.02		-0.05	3.04E-02	0.02	
	a3		-0.26	4.71E-11	0.04		-0.26	4.71E-11	0.04	
	a4		0.23	4.34E-09	0.04		0.23	4.34E-09	0.04	
	a5		0.05	4.84E-03	0.02		0.05	4.84E-03	0.02	
	a6		0.03	7.67E-02	0.01		0.03	7.67E-02	0.01	
			T-P (9변 회귀식)			T-P (9변 회귀식)				
			변수값	P-value	std.dev	변수값	P-value	std.dev		
		a0	조건 1	3.70	6.14E-185	0.04	조건 2	3.70	6.14E-185	0.04
		a1		0.81	5.26E-71	0.03		0.81	5.26E-71	0.03
		a2		0.02	2.22E-01	0.02		0.02	2.22E-01	0.02
		a3		0.06	6.07E-02	0.03		0.06	6.07E-02	0.03
		a4		0.10	2.63E-03	0.03		0.10	2.63E-03	0.03
	a5	-0.04		1.36E-02	0.02	-0.04		1.36E-02	0.02	
	a6	-0.04		6.82E-03	0.01	-0.04		6.82E-03	0.01	

## 4.4 수질 경향성 분석

LOADEST 회귀식의 매개변수 분석을 통한 대상지점의 BOD 및 T-P의 경향성을 분석하였다. 유량에 관한 매개변수  $a_1$ ,  $a_2$  값은 측정 위치 또는 측정시간에 의해 영향을 받는다. 측정 위치로의 매개변수 영향은 횡단면 위치, 하수처리장, 저수지 및 주야간, 겨울 및 여름철의 홍수, 가뭄 등이 있다.

대상지점의 대부분  $a_1$ ,  $a_2$ 의 매개변수값과 P-value는 양의 값과 0.01보다 적음(매우 유의)으로 유량과 관련성이 높은 것으로 분석되었다. 매개변수  $a_1$ ,  $a_2$ 는 측정 기간에는 측정 위치가 균일하고 수위-유량과의 상관성은 광주천2와 풍영정천에서 높았고,  $a_1$ 은 가뭄이나 홍수 등의 유량 변화로 측정 지점의 위치가 자주 변동되는 지석천4, 황룡강3-1, 평동천에서 유의한 것으로 분석되었다.

계절과 관련성을 나타내는 매개변수  $a_3$ ,  $a_4$ 는 각각 Sin, Cos의 간격(주기)과 순서로 관련성을 나타냈다. 회귀식의 Sin은 상승곡선이고, Cos은 하강곡선으로 계절의 주기를 반영한다. 대상지점의 대부분은 여름철과 겨울철에 유량 변동과 측정 주기, 시기에 따른 유량 변동 차이로 인해 회귀식의 P-value는 0.01 ~ 0.1(보통 유의) 사이로 계절 주기에 따른 수질의 변화는 적은 것으로 나타났다.

연중시간과 관련 있는 시간(Dtime)의 매개변수( $a_5$ ,  $a_6$ )는 대상지점에서 매개변수 값과 P-value는 대부분 0.01 ~ 0.1(보통 유의), 0.01보다 작음(매우 유의) 사이로 나타나 시간에 따른 수질은 광주천2, 지석천4에서 개선되는 것으로 분석되었다. BOD의 조건1과 조건2의 LOADEST 회귀식은 풍영정천과 황룡강3-1에서 다르게 모의 되어 평가되었다. 풍영정천은 조건2에서 시간(Dtime<sup>2</sup>) 매개변수( $a_6$ )가 고려되지 않은 8번 회귀식으로 모의 되어 시간(Dtime<sup>2</sup>)의 변수와의 관련성은 낮은 것으로 분석되었다. 황룡강3-1은 유량과 관련 있는 매개변수( $a_2$ )와 시간(Dtime<sup>2</sup>) 매개변수( $a_6$ )를 고려되지 않은 7번 회귀식으로 모의 되어 유량과 시간(time<sup>2</sup>)의 변수는 BOD와 관련성이 낮은 것으로 분석되었다. 풍영정천과 황룡강 3-1의 BOD의 특성은 시간 변수에 의한 수질의 변화가 적은 것으로 분석되었다. T-P의 LOADEST 모의에서 풍영정천과 평동천은 시간(Dtime<sup>2</sup>) 매개변수( $a_6$ )가 고려되지 않은 8번 회귀식으로 모의 되었고, 황룡강 3-1은 연중시간과 관련 있는 매개변수( $a_5$ ,  $a_6$ )가 고려되지 않은 6번 회귀식으로 모의 되어 시간(time)의 변수와 관련성이 낮은 결과로 분석되었다.

표 4.11 LOADEST 회귀식(9번) AMLE 변수

지점	항 목	Q			Season		Time		R[%]
		a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	
광주천2	BOD	6.18	0.88	0.10	-0.33	0.09	0.06	-0.05	63
풍영정천		5.96	1.07	0.07	-0.33	0.04	0.07	0.00	82
황룡강3-1		6.93	0.80	0.01	-0.20	0.15	0.08	0.00	70
평동천		4.73	1.10	0.04	-0.21	0.09	0.00	0.04	91
지석천4		6.44	0.87	-0.05	-0.26	0.23	0.05	0.03	79
광주천2	T-P	2.83	1.20	0.12	-0.10	0.12	0.08	-0.03	75
풍영정천		2.78	1.20	0.08	-0.15	0.13	0.09	0.00	89
황룡강3-1		3.38	0.96	0.15	-0.04	0.11	0.02	-0.02	79
평동천		2.13	1.02	0.07	-0.14	-0.18	0.06	-0.01	89
지석천4		3.70	0.81	0.02	0.06	0.10	-0.04	-0.04	78

표 4.12 LOADEST 회귀식(0번 자동선택) AMLE 매개변수

지점	항 목	No.	Q			Season		Time		R[%]
			a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	
광주천2	BOD	0(9)	6.18	0.88	0.10	-0.33	0.09	0.06	-0.05	63
풍영정천		0(8)	5.97	1.07	0.07	-0.33	0.04	0.07	-	82
황룡강3-1		0(7)	6.94	0.80	-	-0.21	0.15	0.08	-	70
평동천		0(9)	4.73	1.10	0.04	-0.21	0.09	0.00	0.04	91
지석천4		0(9)	6.44	0.87	-0.05	-0.26	0.23	0.05	0.03	79
광주천2	T-P	0(9)	2.83	1.20	0.12	-0.10	0.12	0.08	-0.03	75
풍영정천		0(8)	2.79	1.20	0.08	-0.15	0.13	0.09	-	89
황룡강3-1		0(6)	3.34	0.94	0.16	-0.03	0.11	-	-	79
평동천		0(8)	2.11	1.02	0.08	-0.14	-0.17	0.06	-	89
지석천4		0(9)	3.70	0.81	0.02	0.06	0.10	-0.04	-0.04	78

- Q : 유량변화에 따른 변화를 고려할 수 있는 변수
- Season : 계절에 따른 변화 주기를 고려할 수 있는 변수
- Time : 연중 시간적 특성을 고려할 수 있는 변수

## 제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 2016년부터 2020년까지 광주천2, 풍영정천, 황룡강3-1, 평동천, 지석천4지점을 대상으로 측정된 유량 및 수질자료를 활용하여 LOADEST 모델에 조건1(9번 회귀식), 조건2(0번(자동선택)회귀식)으로 구분하여 회귀식에 따른 매개변수를 분석하여 수질의 경향성을 분석하였다.

1. LOADEST 모델의 모의는 회귀식 선택은 조건1(9번 회귀식), 조건2(0번(자동선택) 회귀식)로 구분하여 모의한 결과 대상지점의 대부분 9번 회귀식을 선택하였으며 일부 6번, 7번, 8번 회귀식으로 Sin(dtime), Cos(dtime)함수가 모두 포함된 회귀식을 선택하였다. 조건1과 조건2의 모의 값(부하량)은 비슷한 결과를 나타내었다.

2. 장기간 주기적인 측정자료는 회귀식 자동 선택 시 6번 회귀식 이상으로 선택되는 것으로 분석되었으며, LOADEST 모델의 회귀식 선정은 모의 값이 큰 차이를 보이지 않은 지점의 경우 유량, 계절과 시간에 대한 매개변수를 최소화하는 특성이 있는 것으로 나타났다. LOADEST 모델의 회귀식은 매개변수가 적은 회귀식의 경우 매개변수값은 증가하고, 편차는 감소하는 것으로 나타나 회귀식을 통한 대상지점의 수질의 요인 분석은 각 지점의 특성을 고려하여 적용하여야 한다.

3. 대상지점 수질의 경향성은 유량의 변동과 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 계절과 시간에 따른 상관성은 지점의 측정 주기와 시기에 따라 유의하거나 적은 것으로 분석되었다. 시간에 따른 상관성은 광주천2, 지석천4에서 -(부)의 관계로 개선되는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 LOADEST 모델의 모의 결과는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었으며, 홍수기(고유량)의 모의 값은 과소 평가되는 것으로 평가되어 이상치를 보인 측정자료와 저유량, 고유량 측정자료에 대한 검토 및 보정이 필요한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과로 장기적인 모니터링자료의 경향성 분석을 함으로써 수질관리를 위한 정책과 기초자료로 활용 및 반영이 가능할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 강문성, 김철겸(2009), 최근 수질모델링 기법 및 연구동향, 한국관계배수, 16권, 1호, pp. 20-29
2. 강문성, 조재필, 전종안, 박승우(2009), 농업 소유역 격자단위 오염부하량 평가, 한국농공학회, 51권, 5호, pp. 87-97
3. 김계웅(2015), 미계측 유역 오염부하량 모의를 위한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정, 석사학위논문, 서울대학교
4. 김계웅, 강문성, 송정현, 박지훈(2018), 유역특성에 따른 LOADESET 회귀모형 매개변수 추정, 한국수자원학회, 51권, 2호, pp. 151-163
5. 김중건, 박윤식, 이서로, 신용철, 임경재, 김기성(2017), 머신러닝기법을 활용한 유황별 LOADEST 모형의 적정 회귀식 선정연구:낙동강 수계를 중심으로, 한국농공학회, 99권 4호, pp. 97-197
6. 나은혜, 박석순(2003), 로그선형모델을 이용한 팔당호 유입지류 수질의 연속성 시뮬레이션과 경향 분석, 한국하천호수학회, 36권, 3호, pp. 336-343
7. 박승수(2003), 비점원 오염 모델의 종류와 적용방법, 물과 미래, 39권, 12호, pp. 19-26
8. 박윤식(2014), 유전자 알고리즘과 회귀식을 이용한 오염부하량의 예측, 한국환경농학회 33권, 1호, pp. 37-43.
9. 박윤식, 이지민, 정형훈, 신민환, 박지형, 황하선, 류지철, 박장호, 김기성(2015), 한강수계에서의 부유사 예측을 위한 LOADEST 모형의 회귀식의 평가, 한국농공학회, 57권, 2호, pp. 37-45

10. 신민환, 원철희, 최용훈, 김기철, 서지연, 임경재, 최종대(2008), 월곡리 유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모델의 적용성 평가, 한국농공학회, 학술대회초록집, pp. 99-105
11. 신민환, 서지연, 최용훈, 김종건, 신동석, 이열재, 정명숙, 임경재, 최종대(2009), 농촌유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모델의 적용성 평가, 한국물환경학회, 25권, 2호, pp. 212-220
12. 엄미정, 문영훈, 안병구, 신용규(2008), 전북지역 농업용 하천유역의 수질과 부하량 특성, 한국환경농학회 27권, 2호, pp. 111-119
13. 엄명철(2004), 하구담수호 유역의 시공간적 오염물질 배출구조 해석, 박사학위논문, 서울대학교
14. 영산강·섬진강수계관리위원회(2020), 영산강·섬진강수계 소유역 하천모니터링 사업 최종보고서
15. 장원석, 류지철, 강현후, 이지원, 김기성, 임경재(2011), 효과적인 하천 오염 부하량 산정 위한 NI 방법 및 ESTIMATOR, LOADEST 모형 적용 및 평가, 강원 농업생명환경연구, 23권, 1호, pp. 1-10
16. 최동호, 정재운, 이경숙, 최유진, 윤광식, 조소현, 박하나, 임병진, 장남익(2012), 유량-부하량관계식을 이용한 주암호 외남천 유역의 유황별 유달을 산정, 한국환경과학회, 21권, 1호, pp. 31-39
17. 하돈우(2017), 물관리 정책을 위한 수질평가 방법과 적용, 박사학위논문, 호남대학교
18. 환경부(2008), 수질오염총량관리제도 고시·훈령·규정집
19. 환경부(2015), 수질예보 및 대응조치에 관한 규정 훈령 1188호



20. Cohn, T. A., Caulder, D. L., Gilroy, E. J., Zynjuk, L. D., and Summers, R. M.(1992a), The validity of a Simple Log-linear Model for Estimating Fluvial Constituent Loads: An empirical Study Involving Nutrient Loads Entering Chesapeake Bay, Water Resources Research, Vol. 28, Issue. 9, pp. 2353-2363
21. Cohn, T. A., Gilroy, E. J., and Baier, W. G.(1992b), Estimating Fluvial Transport of Trace Constituents using a Regression Model with Data Subject to Censoring, Proceedings of the Joint Statistical Meeting, pp. 142-151
22. Cohn, T. A.(2005), Estimating Contaminant Loads in Rivers : An Application of Adjusted Maximum Likelihood to Type I Censored Data, Water Resources Research, Vol. 41, Issue. 8, pp. 13
23. 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, Vol. 50, Issue. 3, pp. 885-900
24. Park, Y. S., B. A. Engel.(2014), Use of Pollutant Load Regression Models with Various Sampling Frequencies for Annual Load Estimation, Water, Vol. 6, pp. 1685-1697
25. Runkel, R. L., C. G. Crawford, and T. A. Cohn.(2004), Load Estimator (LOADEST): A FORTRAN Program for Estimating Constituent Loads in Streams and Rivers, U.S. Geological Survey
26. Helsel, D. R., and Hirsch, R. M.(2002), Statistical Methods in Water Resources, U.S. Geological Survey, pp. 295-320