



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학석사학위 청구논문

미계측 유역 오염부하량 모의를 위한  
LOADEST 회귀모형 매개변수 추정

Estimation of LOADEST Coefficient  
for Simulating Pollutant Loads  
in Ungauged Watersheds

2015년 7월

서울대학교 대학원  
생태조경·지역시스템 공학부  
지역시스템공학전공  
김 계 응

미계측 유역 오염부하량 모의를 위한  
LOADEST 회귀모형 매개변수 추정

Estimation of LOADEST Coefficient  
for Simulating Pollutant Loads  
in Ungauged Watersheds

지도교수 강 문 성  
이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015년 6월

서울대학교 대학원  
생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공  
김 계 응

김 계 응의 공학석사 학위논문을 인준함  
2015년 7월

위 원 장 \_\_\_\_\_(인)

부위원장 \_\_\_\_\_(인)

위 원 \_\_\_\_\_(인)

## 국 문 초 록

본 연구에서는 미계측 유역에서 오염부하량 모의를 위해, 81개 유역을 대상으로 LOADEST (LOAD Estimator) 기반 회귀모형의 최적 매개변수를 추정하고, 다중회귀분석과 인공신경망 기법을 이용하여 유역 특성에 따른 회귀 모의 모형의 매개변수 추정 방법을 개발하였으며, 시범 유역을 대상으로 개발된 모형의 적용성을 평가하였다.

오염부하량 모의를 위한 회귀모형으로, T-N (Total-Nitrogen)은 LOADEST의 5번 회귀모형을, T-P (Total-Phosphorous)는 3번 회귀모형을 선택하였다. 81개 유역을 연구대상지로 선정하여, 오염물질별 선택된 회귀모형의 최적 매개변수를 추정하고, 오염부하량을 모의하였다. 모의결과, T-N, T-P 모두 선택된 회귀모형이 실측치를 잘 반영하여 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 두 물질 모두 오염부하량이 과소 모의되어 실측치와 편의가 발생하는 것으로 나타나, 분위사상법을 이용하여 모의치의 편의보정을 실시하였다. 보정결과, 모형의 정확도는 크게 변하지 않았으며, 오염부하량이 과소 모의 되는 경향이 다소 감소하는 것으로 나타났다.

미계측 유역에서 회귀모형 매개변수 추정을 위해, 다중회귀분석과 인공신경망을 이용하였으며, 81개 유역의 최적 매개변수와 유역특성 자료를 이용하여 매개변수 추정방법을 개발하였다. 개발된 두 방법을 이용하여, 매개변수를 추정하고, 오염부하량을 모의한 결과, 두 방법 모두 실측치를 잘 반영하여 모의할 수 있는 것으로 나타났으며, 최적 매개변수에 의한 모의치와 유사한 모의능력을 갖는 것으로 나타났다.

개발된 두 모형의 적용성 검토를 위해, 4개의 시범유역을 대상으로 매개변수를 추정하고, 모의를 실시하였다. 모의결과, 두 방법 모두 실측치를 잘 반영하여 모의할 수 있는 것으로 나타났으며, 실측치 기반 매개변수와 비교하여 유사한 모의능력을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 매개변수 추정방법은 통계적 변량을 통해 실측치

를 잘 반영하여 모의되는 것으로 나타났으며, 실측치 기반 매개변수에 의해 모의된 값과도 유사한 모의능력을 보이는 것으로 나타나, 추후 실측자료가 확보되지 않은 농업용 저수지 소유역에 대한 오염부하량 모의와 정책결정을 위한 스크린 모델로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 회귀모형, 오염부하량, LOADEST, 다중회귀, 인공신경망

학 번 : 2013-23256

# 목 차

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 국 문 초 록 .....               | I   |
| 목 차 .....                   | III |
| List of Tables .....        | V   |
| List of Figures .....       | VII |
| <br>                        |     |
| 제 1 장 서 론 .....             | 1   |
| <br>                        |     |
| 제 2 장 연 구 사 .....           | 4   |
| 2.1 수질모형 .....              | 4   |
| 2.2 오염부하량 산정 회귀식 .....      | 5   |
| 2.3 매개변수 지역화 .....          | 6   |
| <br>                        |     |
| 제 3 장 이론적 배경 .....          | 7   |
| 3.1 LOADEST 모형 .....        | 8   |
| 3.1.1 모형의 입출력구조 .....       | 8   |
| 3.1.2 모형의 회귀식 .....         | 9   |
| 3.2 모형회귀변수 .....            | 12  |
| 3.2.1 다중회귀분석 .....          | 12  |
| 3.2.2 인공신경망 .....           | 13  |
| 3.3 회귀모형 편의보정 .....         | 14  |
| <br>                        |     |
| 제 4 장 대상유역 및 자료구축 .....     | 15  |
| 4.1 대상유역 및 수문·수질자료 구축 ..... | 15  |
| 4.2 지형자료 구축 .....           | 16  |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 제 5 장 LOADEST 기반 오염부하량 추정 회귀모형 개발 | 20 |
| 5.1 유역별 오염부하량 추정 회귀모형 구축          | 20 |
| 5.1.1 T-N 부하량 추정 회귀모형 구축          | 24 |
| 5.1.2 T-P 부하량 추정 회귀모형 구축          | 29 |
| 5.1.3 T-N 및 T-P 오염부하량 편의보정        | 34 |
| 5.2 다중회귀분석을 이용한 회귀식 매개변수 추정       | 38 |
| 5.2.1 T-N 회귀식 매개변수 추정             | 38 |
| 5.2.2 T-P 회귀식 매개변수 추정             | 44 |
| 5.3 인공신경망을 이용한 회귀식 매개변수 추정        | 49 |
| 5.3.1 T-N 회귀식 매개변수 추정             | 49 |
| 5.3.2 T-P 회귀식 매개변수 추정             | 53 |
| <br>                              |    |
| 제 6 장 미세측 유역 적용성 평가               | 57 |
| 6.1 다중회귀분석을 이용한 회귀식 매개변수 검정       | 57 |
| 6.2 인공신경망을 이용한 회귀식 매개변수 검정        | 62 |
| 6.3 회귀식의 비교 및 평가                  | 66 |
| <br>                              |    |
| 제 7 장 요약 및 결론                     | 70 |
| <br>                              |    |
| Reference                         | 74 |

# List of Tables

|  |    |
|--|----|
| Table 3.1 Regression equation of the LOADEST model .....   | 11 |
| Table 4.1 Characteristics and land use of the study watersheds .....   | 17 |
| Table 5.1 General performance ratings for selected statistics for a monthly<br>time step (Moriassi et al., 2007) ..... | 23 |
| Table 5.2 LOADEST Model T-N coefficients of the study watersheds .....   | 26 |
| Table 5.3 LOADEST Model T-P coefficients of the study watersheds .....   | 31 |
| Table 5.4 Correlation between the watershed characteristics and T-N<br>model coefficients .....                        | 39 |
| Table 5.5 T-N Model coefficients regression considering watershed<br>characteristics .....                             | 39 |
| Table 5.6 LOADEST Model T-N coefficients by MLR of the study<br>watersheds .....                                       | 41 |
| Table 5.7 Correlation between the watershed characteristics and T-P model<br>coefficients .....                        | 44 |
| Table 5.8 T-P Model coefficients regression considering watershed<br>characteristics .....                             | 44 |
| Table 5.9 LOADEST Model T-P coefficients by MLR of the study<br>watersheds .....                                       | 46 |
| Table 5.10 LOADEST Model T-N coefficients by ANN of the study<br>watersheds .....                                      | 50 |
| Table 5.11 LOADEST Model T-P coefficients by ANN of the study<br>watersheds .....                                      | 54 |
| Table 6.1 Characteristics and land use for evaluating watersheds .....   | 57 |
| Table 6.2 T-N Model coefficientss by LOADEST and MLR .....   | 58 |
| Table 6.3 T-N Statistics of the LOADEST and MLR performance .....  | 58 |
| Table 6.4 T-P Model coefficientss by LOADEST and MLR .....   | 60 |
| Table 6.5 T-P Statistics of the LOADEST and MLR performance .....  | 61 |
| Table 6.6 Model coefficientss by LOADEST and ANN .....   | 62 |
| Table 6.7 T-N Statistics of the LOADEST and ANN performance .....  | 63 |
| Table 6.8 Model coefficientss by LOADEST and ANN .....   | 64 |
| Table 6.9 T-P Statistics of the LOADEST and ANN performance .....  | 65 |

Table 6.10 T-N and T-P Statistics of the LOADEST, MLR and ANN  
performance ..... 67

# List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 3.1 Schematic diagram of this study .....  | 7  |
| Fig. 3.2 Input and output of the LOADEST model (Runkel et al., 2004) .....  | 9  |
| Fig. 4.1 Location map of the study watersheds .....   | 16 |
| Fig. 5.1 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the<br>simulated from the study watersheds .....         | 25 |
| Fig. 5.2 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the<br>simulated from the study watersheds .....         | 30 |
| Fig. 5.3 Scatter plots of the observed T-N and T-P pollutant loads against<br>the simulated from the study watersheds ..... | 35 |
| Fig. 5.4 Statistics of the simulated T-N pollutant loads and the bias<br>corrected T-N pollutant loads .....                | 36 |
| Fig. 5.5 Statistics of the simulated T-P pollutant loads and the bias<br>corrected T-P pollutant loads .....                | 37 |
| Fig. 6.1 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the<br>simulated by MLR .....                            | 59 |
| Fig. 6.2 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the<br>simulated by MLR .....                            | 61 |
| Fig. 6.3 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the<br>simulated by ANN .....                            | 63 |
| Fig. 6.4 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the<br>simulated by ANN .....                            | 65 |
| Fig. 6.5 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the<br>simulated .....                                   | 68 |
| Fig. 6.6 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the<br>simulated .....                                   | 69 |

# 제 1 장 서 론

우리나라의 수질오염 관리 정책은 1989년 초 처음 수립되어 지속적인 관심과 투자를 통해 하수도 보급률을 2008년 말 89%까지 향상시켰으며 (환경부, 2009), 하수처리장, 폐수처리장 등의 환경기초시설의 건설을 통해 수질개선을 위한 노력을 꾸준히 진행하여 왔다. 우리나라의 수질개선사업은 관리가 용이한 점오염원 위주로 이루어져 왔으며, 그에 따라 점오염원에 의한 수질개선 효과는 지속적으로 증가하여 왔다. 그러나 점오염원 관리를 통해 하천의 목표수질을 달성하는 것은 한계에 다다른 상태이며, 이로 인해 비점오염원으로 인한 하천오염 부하율은 지속적으로 증가하고 있는 상황으로 2020년에는 약 72%에 달할 것으로 보고되고 있다 (환경부, 2006; 관계부처합동, 2012).

비점오염원으로 인한 수질문제의 해결을 위해 정부는 4대강 비점오염원 종합대책, 제2차 비점오염원관리 종합대책, 수질오염총량관리제도 등을 수립하여 비점오염원 관리를 위한 지속적인 대책마련을 해오고 있다. 그 중 수질오염총량관리제도가 실시됨에 따라 기존의 배출되는 수질오염물질의 농도를 관리하는 것에서 벗어나 유역단위의 오염부하량 관리가 중요하게 되었으며, 유역단위의 목표수질 설정 및 할당부하량 산정을 위해 오염부하량을 예측하는 과정은 필수적인 과정으로 자리잡게 되었다 (환경부, 2004).

오염부하량을 추정하는 방법으로는 원단위법, 수질모형을 이용한 모의, 유량-부하량 관계식에 의한 방법 등이 있다 (박승우, 2006). 원단위법은 오염물질별로 토지이용별 단위 면적당 부하량에 면적 또는 오염원수를 곱하여 추정하는 방법이다. 비교적 간단하게 오염부하량을 추정할 수 있어 실무에 널리 이용되어 왔으나, 오염물질별 원단위에 의해 정확도가 크게 좌우되며 비점오염물질의 운송기작을 파악할 수 없는 단점이 있다 (박승우, 2006).

다른 방법으로는 수질모형을 이용하여 모의하는 방법이 있다. 수질모

형은 대부분 물리적 매개변수 기반 분포형 모형으로 오염물질의 기작 및 이송과정을 모의하고 파악할 수 있는 장점이 있다. 수질모형은 적용 범위에 따라 포장단위 모형과 유역단위 모형으로 나뉘며, 유역단위 오염부하량 모의를 위해 자주 사용되는 수질모형은 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) (Donigian et al., 1984), SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998), AGNPS (AGricultural Non-Point Source) (Young et al., 1989), SWMM (Storm Water Management Model) (Huber and Dickinson, 1988) 등이 있다 (강문성 등, 2009; 정한석, 2014). 이들 수질모형은 수문사상과 대상지역에 따라 적합한 모형이 선택되어 사용되며, 유역 내 다양한 시나리오를 적용하여 오염부하량의 변동을 모의하는 연구가 다수 진행되고 있다 (Shen et al., 2013; Zhang et al., 2013; Que et al., 2015; 강문성 등, 2009; 정충길 등, 2013; 김민주 등, 2014). 이와 같은 유역수질모형은 구체적인 수문/수질 모의과정을 묘사할 수 있으나, DEM, 토지이용 등 공간분포형 입력자료로 인한 많은 매개변수는 모의 과정을 복잡하게 하며, 보정 과정에 있어 많은 시간과 노력을 요구하는 단점이 있다.

수질모형에 비해 비교적 간단하게 오염부하량을 추정하는 방법으로 유량-부하량 관계식과 같은 통계적 분석에 의한 회귀식이 사용된다. 회귀식은 실측된 유량 및 수질 데이터를 통계분석하여 산정되며, 수문모델이나 실측을 통해 구축된 유량자료를 회귀식에 대입하여 모의함으로써 산정한다 (엄명철, 2004). 오염부하량을 모의하는 회귀식은 다양한 형태가 존재하며, 최근에는 LOADEST (LOAD ESTimation)를 이용하여 회귀식을 개발하는 연구가 증가하고 있다. LOADEST는 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 개발한 회귀식 기반 프로그램으로 다양한 연구자들에 의해 이용되고 평가되고 있다. 국외에서는 Carey et al. (2011), Jha et al. (2013), Das et al. (2013) 등이 적용성을 검토한 사례가 있으며, 국내에서는 신민환 등 (2009), 박윤식 등 (2014)이 적용성을 검토한 바 있다. 그러나 이들 회귀식은 특정 유역을 대상으로 개발된 모형으로 수문·수질 자료가 없는 미계측 유역에 적용

하는 것에는 어려움이 있다.

유출량 해석과 관련된 연구에서는 회귀식의 미계측 유역 적용을 위해 개념적 수문모델이나 회귀식의 매개변수를 지역화하는 연구가 다수 진행되어 있다. 국외에서는 Yokoo et al. (2001), Heuvelmans et al. (2006), Young (2006), Hundecha et al. (2008) 등이 유출량 모의를 위한 회귀식 계수와 모형 매개변수를 지역화하는 연구를 진행한바 있으며, 국내에서도 개념적 모형인 탱크모형의 매개변수를 지역화하는 연구를 다양한 연구자들이 진행해온바 있다 (김현영과 박승우, 1988; 허유만 등, 1992; 김선주 등, 2000; 안지현, 2013). 이와 같이 유출량 해석분야에서는 개념적 모형과 회귀식을 미계측 유역에 적용하기 위해 매개변수 지역화를 위한 다양한 시도가 이어져 왔으나, 오염부하량 산정의 경우 1986년 미국에서 Driver와 Tasker가 미국의 도시유역을 대상으로 토지 이용 및 기후특성을 고려한 강우시 오염부하량 모의 회귀식을 개발한 이래로 국내외적으로 오염부하량 회귀식을 미계측 유역에 적용한 연구 사례는 부족한 상황이다.

본 연구에서는 미계측 유역에서 오염부하량 모의를 위해, (1) 유역별 LOADEST 기반 회귀식의 최적 매개변수를 추정하고, (2) 다중회귀분석과 인공신경망 기법을 이용하여 유역특성자료를 통한 회귀 모의 모형의 매개변수 추정 방법을 개발하며, (3) 개발된 매개변수 추정 방법을 이용하여 오염부하량을 모의하고, 적용성을 평가하고자 한다.

## 제 2 장 연 구 사

### 2.1 수질모형

유역에서 오염물질의 운송 기작을 정량적으로 추정하기 위한 수질모형은 1970년대 미국에서 본격적으로 개발된 이후로 비점오염원의 발생과 배출량을 추정하는 도구로 발전되어 왔다. 최근에는 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS), 원격탐사 (Remote Sensing, RS) 등의 새로운 기술이 발달함에 따라 이를 수질모형에 통합하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 수질오염총량제의 실시에 따라 비점오염원의 발생과 배출량을 추정하는 필수적인 도구로 이용되고 있다 (박승우, 2006, 강문성 등, 2009, 김민주 등, 2014).

비점오염원에 의한 오염부하량을 추정하기 위한 수질모형으로는 HSPF, AGNPS, AnnAGNPS, SWAT, SWMM 등의 모형이 주로 사용되고 있으며, 대상 유역 및 사용 목적에 따라 모형을 선택하고 다양한 시나리오를 적용하여 오염부하량을 추정하는 연구가 진행되고 있다 (Shen et al., 2013; Zhang et al., 2013; Que et al., 2015; 강문성 등, 2009; 정충길 등, 2013; 김민주 등, 2014).

Shen et al. (2013)은 중국의 The Three Gorges Reservoir 유역을 4개의 소유역으로 나누어, 토지이용과 토양특성이 질소와 인의 부하량에 미치는 영향을 SWAT 모형을 이용하여 평가하였으며, Zhang et al. (2013)은 SWAT 모형에 CLUE-S 모형을 통합하여 토지이용 시나리오에 따른 질소와 인의 부하량을 비교하였다. 또한, Que et al. (2015)은 AnnAGNPS 모형을 이용하여 암거배수시설 (Tile drainage)의 설치가 농업비점오염 저감에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 정충길 등 (2013)은 SWAT 모형과 HSPF 모형을 이용하여, 밭에 최적관리기법으로 벧집지표피복 시나리오를 적용하였을 때 저감효과를 평가하였으며, 김민주 등 (2014)은 HSPF 모형을 이용하여 미호천 유역의 비점오염물

질 유출특성을 분석하고 인공습지 시나리오를 적용하여 비점오염물질 저감효과를 분석하였다.

## 2.2 오염부하량 산정 회귀식

수질모형을 이용하여 오염부하량을 모의할 경우에는 분포형 수문모형의 사용이 필수적이거나 분포형 모형은 모의 시간이 길고 복잡하여 사용이 어려우며 일부 매개변수는 추가적인 보정이 필요하다 (김철겸과 김남원, 2012; 강민구 등, 2013; 김계웅 등, 2014; 박윤식, 2014). 따라서 비교적 간단하게 오염부하량을 모의할 수 있는 회귀식 개발에 대한 연구가 진행되어 왔다. 회귀식 개발은 유역별로 간단한 유량-부하량 관계식을 만드는 것에서 시작하여, 최근에는 다양한 회귀식과 통계적 분석을 포함하고 있어 회귀식 개발에 적용이 간편한 LOADEST 모형을 이용한 연구가 다수 수행되고 있다.

Stenback et al. (2011)은 질소와 인의 부하량 추정에 있어 LOADEST 모형에 포함된 9번 회귀식의 적용성을 검토하였으며, Carey et al. (2011)은 LOADEST 모형을 이용한 질소와 인의 부하량 추정 값과, 오염부하량 경향분석 결과 그리고 Pollutant Index가 수질개선을 위한 유역관리에 도움이 될 수 있다고 보고하였다. Jha et al. (2013)은 LOADEST 모형의 회귀식을 통계적 변량에 따라 자동선택하여 질소와 인의 부하량을 모의하고 평가하였으며, Das et al. (2013)은 Yarra강 유역에서 기후변화와 토지이용현황이 부하량에 미치는 영향을 LOADEST 모형을 이용하여 분석하였다.

LOADEST 모형을 이용한 회귀식 개발은 대부분 국외의 다양한 국가, 유역에서 진행되어 왔으며, 국내에서는 몇몇 연구자들에 의해 적용성이 평가되고 있는 상황이다. 신민환 등 (2009), 장원석 등 (2011)은 농촌 소유역과 하천을 대상으로 NI 방법, ESTIMATOR 모델, LOADEST 모델을 이용하여 오염부하를 산정하고 비교·평가하였으며, 박윤식 등 (2015)은 LOADEST 모형을 이용하여 한강수계의 유역을 대

상으로 부유사를 예측하고 평가하였다.

## 2.3 매개변수 지역화

국내외적으로 미계측 유역에서 수문·수질 예측에는 물리적 매개변수 기반의 분포형 모형이 사용되고 있다. 그러나 분포형 모형은 구조가 복잡하고 모의시간이 오래걸린다는 단점이 있다. 또한 물리적으로 산정된 매개변수 중에도 추가적인 보정과정이 필요한 매개변수도 있으며, 많은 매개변수를 갖는 모형이 반드시 정확하게 모의한다고 할 수 없다 (Beven et al., 1989; 2007; 강민구 등, 2013; 김계웅 등, 2014). 그래서 비교적 간단하고 매개변수가 적은 개념적 모형과 회귀식의 매개변수 지역화에 대한 연구가 진행되고 있다.

유럽에서는 Post et al. (1999)은 개념적 수문모형인 IHACRES 모형의 매개변수를 종속변수로, 유역특성을 독립변수로 하는 매개변수 지역화식을 개발하였으며, Hundecha et al. (2004, 2006)는 개념적 수문모형인 HBV 모형의 매개변수를 종속변수로, 토지이용 및 유역특성을 독립변수로 하는 매개변수 지역화식을 개발하였다. 또한, Fernandez et al. (2009)은 abcd 모형의 매개변수를 유역특성에 따라 지역화 하였다. 국내에서는 TANK 모형의 매개변수 지역화에 대한 연구가 다수 진행되었으며 (김현영과 박승우, 1988; 허유만 등, 1992; 김선주 등, 2000; 안지현, 2013), 이병주 등 (2009)은 SWAT 모형의 추정이 어려운 매개변수를 주성분분석과 군집분석을 결합한 다변량 통계분석을 통해 지역화하였다. 한편, Driver and Tasker (1988)는 미국의 도시유역을 대상으로 강우시 유역특성 및 기후특성에 따른 오염물질별 연단위 발생부하량을 추정하는 회귀식을 개발한바 있다.

대부분 유출량과 관련하여 연구가 진행되었으며 수질모의와 관련된 매개변수 지역화 연구는 Driver and Tasker (1988)가 연구를 진행한 이후로 미비하다.

### 제 3 장 이론적 배경

본 연구에서는 오염부하량 추정 회귀모형을 개발하기 위하여 수질오염총량제를 실시하는 유역의 수질자료와 유량자료를 이용하여 LOADEST 기반 최적 회귀모형을 구축하였으며, 미계측 유역 적용을 위해 다중회귀분석과 인공신경망을 이용하여 회귀모형 매개변수 추정을 실시하고 검증하였다. Fig. 3.1은 전체적인 연구흐름도이다.

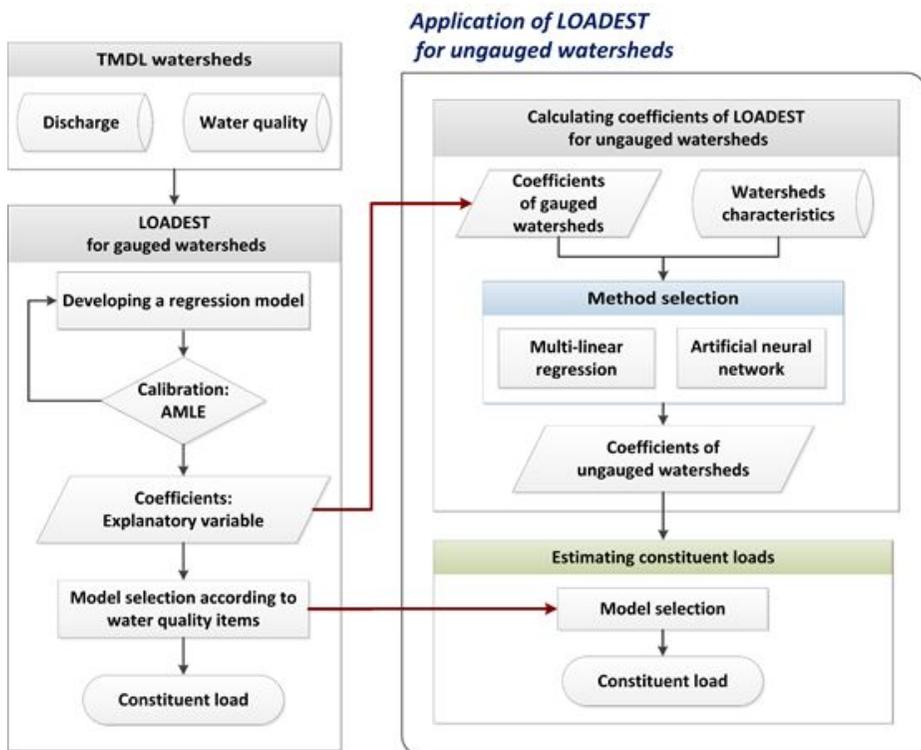


Fig. 3.1 Schematic diagram of this study

## 3.1 LOADEST 모형

LOADEST 모형은 하천의 오염부하량을 예측하기 위해 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 개발된 회귀식 기반 프로그램으로, 실측된 유량과 수질자료를 이용하여 프로그램에 내재된 오염부하 추정 회귀식의 매개변수를 보정하여 사용자가 최적 회귀 모델을 선택할 수 있도록 하는 모형이다 (Runkel et al., 2004). 모형 내 회귀식의 보정 및 검정을 위한 다양한 통계적 방법이 내재되어 있으며, 잔차분석, 월별 오염부하량, 표준오차 및 95% 신뢰수준에 대한 통계적 분석을 통해 모형의 적절성을 용이하게 평가할 수 있다 (Runkel et al., 2004; 신민환 등, 2009).

### 3.1.1 모형의 입출력구조

LOADEST 모형은 Fig. 3.1과 같이 4개의 입력자료와 4개의 출력자료로 구성된다. Control file은 모형의 입력자료로 사용될 파일의 이름을 정의하는데 사용되며, header file은 오염부하를 모의할 수질항목, 사용하고자 하는 회귀식의 종류, 부하량 추정방법 등을 정의하는데 사용된다. Calibration file은 LOADEST 모형의 회귀식을 보정하는데 사용할 수질항목의 농도와 유량자료를 포함하고 있으며, estimation file은 보정된 회귀식을 이용하여 모의하고자 하는 기간의 유량자료를 포함하고 있다. 위와 같이 4개의 입력자료를 구축하여 LOADEST 모형을 실행할 경우 4개의 출력자료가 생성되게 된다.

Echo file은 모형이 실행되는 과정에서 사용된 입력자료와 발생한 오류를 포함하고 있는 파일로 모형의 실행과정에서 발생한 문제점을 점검하는데 사용된다. Constituent output file은 Part I 과 Part II로 나뉘어 있으며, 유량 및 수질자료를 이용하여 회귀식을 보정한 결과와 개발된 회귀식을 이용하여 추정한 오염부하량 결과를 요약하고 있다. 회귀식을 보정하는 과정에서 도출된 매개변수 및 다양한 통계적 결과를 포함하고

있으며 통계적 수치에 따라 부하량 산정방법을 결정하고, 보정된 모형의 적용성을 평가하는데 사용될 수 있다. Residual output file은 모형의 보정과정에서 생성된 부하량 결과와 잔차를 포함하고 있으며, individual load file은 개발된 회귀식을 이용하여 추정한 오염부하량 결과를 포함하고 있다.

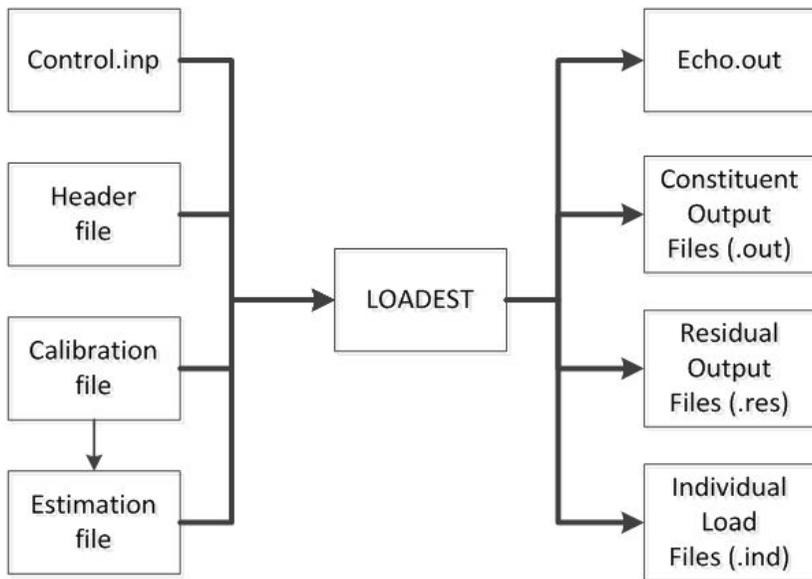


Fig. 3.2 Input and output of the LOADEST model (Runkel et al., 2004)

### 3.1.2 모형의 회귀식

LOADEST 모형은 회귀식을 보정하는데 있어서 MLE (Maximum Likelihood Estimation), AMLE (Adjusted Maximum Likelihood Estimation), LAD (Least Absolute Deviation) 방법을 사용하여 오염부하량을 모의한다. MLE와 AMLE 방법은 보정된 모형의 잔차가 정규분포를 따를 때 사용하는 방법이며, LAD 방법은 그렇지 않을 경우 사용한다. 또한 MLE와 AMLE는 모형의 보정에 사용된 유량 또는 수질자

료의 이상치 수정여부에 따라 분류되며, 수정이 이루어진 경우 AMLE를 사용하며 그렇지 않은 경우 MLE 방법을 사용한다. 각 모의방법에 대한 설명은 Helsel and Hirsch (2002)와 Runkel et al. (2004)에 상세히 기술되어 있다.

Table 3.1은 LOADEST 모형에 내재된 회귀식의 형태를 나타내고 있다. LOADEST 모형의 회귀식은 11가지가 입력되어 있으며, 각 회귀식의 독립변수는 유량과 decimal time으로 구성되어 있다. 각 회귀식은 두 가지 변수 외에도 사용자가 임의로 변수를 추가할 수 있는 특징이 있다. LOADEST 모형의 회귀식은 하나의 종속변수에 여러 개의 독립변수를 가지고 있어 각 독립변수에 의한 다중 공선성이 발생할 수 있다. LOADEST 모형은 다중 공선성을 해결하기 위해 모형의 회귀식에 사용되는 독립변수인 유량과 decimal time을 중심화 (Centering)하여 입력변수로 사용한다. 각 변수의 중심화는 식 (3-1)에 의해 계산된다.

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

여기서, T는 중심화하기 위한 변수의 데이터를,  $\tilde{T}$ 는 T로부터 중심화된 값을,  $\bar{T}$ 는 T의 평균값을, N은 데이터의 개수를 나타낸다.

**Table 3.1 Regression equation of the LOADEST model**

| Model Number | Regression model   |
|--------------|--|
| 1            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q$   |
| 2            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2$   |
| 3            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 dtime$   |
| 4            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi dtime) + a_3 \cos(2\pi dtime)$   |
| 5            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 dtime$   |
| 6            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime)$                           |
| 7            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi dtime) + a_3 \cos(2\pi dtime) + a_4 dtime$                             |
| 8            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime) + a_5 dtime$               |
| 9            | $\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi dtime) + a_4 \cos(2\pi dtime) + a_5 dtime + a_6 dtime^2$ |
| 10           | $\ln(L) = a_0 + a_1 per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q per$   |
| 11           | $\ln(L) = a_0 + a_1 per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q per + a_4 \ln Q^2 + a_5 \ln Q^2 per$                             |

- \* L = constituent load (kg/day)
- \* lnQ = ln(Q) - center of ln(Q)
- \* dtime = decimal time - center of decimal time

## 3.2 모형회귀변수

### 3.2.1 다중회귀분석

가. 다중회귀분석 개요

회귀분석은 한 변수를 종속변수 (Dependent Variable)로 그리고 다른 변수를 독립변수 (Independent Variable)하여 이들 간의 관계를 분석하는 것을 말하며, 다중회귀분석 (Multiple Regression Analysis)은 독립변수가 두 개 이상인 경우를 말한다. 독립변수가 하나인 경우에 비해 추정능력을 높일 수 있으며, 여러 변수간의 관계를 동시에 파악할 수 있는 장점을 갖고 있다.

나. 다중회귀식 추정방식

다중회귀분석을 실시할 때 독립변수를 택하는 방법은 주로 동시입력방식 (enter)과 단계입력방식 (stepwise)이 사용된다. 동시입력방식은 회귀식 개발에 고려되는 모든 입력변수를 동시에 분석하는 방식이다. 동시입력방식은 다른 독립변수들이 통제된 상태에서, 특정 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 분석에 사용되는 모든 독립변수가 종속변수에 미치는 영향정도를 파악할 수 있다.

단계입력방식은 회귀식 개발에 사용되는 독립변수를 하나씩 회귀식에 포함시키는 방식으로, 영향력이 높은 독립변수 순으로 회귀식에 포함된다. 변수가 추가되는 과정에서 나중에 추가된 변수로 인해 기존의 변수가 종속변수와의 영향력이 낮아지게 되면 앞서 포함된 독립변수는 제거되는 과정을 거치며, 이 후 더 이상 추가되거나 제거되는 변수가 없을 때까지 추가와 제거의 과정이 반복된다.

본 연구에서는 단계입력방식을 사용하여 LOADEST 모형 회귀변수를 종속변수로, 유역특성을 독립변수로 하는 회귀분석을 실시하였으며, 회귀분석에는 IBSS SPSS Statistics 22 (SPSS, Inc., 2013)를 이용하였다.

## 3.2.2 인공신경망

### 가. 신경망의 개요

인간의 뇌는 뉴런 (Neuron)이라는 수많은 신경세포로 이루어져 있으며, 뉴런간의 상호작용을 통해 정보를 처리한다. 신경망 모형은 인간의 뇌가 수행하는 정보처리 과정을 수학적으로 모델링한 것으로 입력과 출력을 갖는 통계학적 학습 알고리즘이다.

1943년 McCulloch와 Pitts에 의해 처음 제안되었으며, Frank Rosenblatt (1958)이 퍼셉트론 (perceptron)이란 최초의 신경망 모형을 발표하면서 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 Marvin Minsky와 Seymour Papert (1969)에 의해 배타적 논리합 회로를 처리하지 못하는 단층 신경망의 한계점이 발견되고, 컴퓨터의 연산 능력이 떨어짐에 따라 연구가 더디게 진행되었다.

그 후, 단순 퍼셉트론 (simple perceptron)이 갖는 한계를 극복하기 위해 은닉층을 갖는 다층 퍼셉트론 (multi-layer perceptron)과 같은 새로운 모형이 제시되었으나, 이를 위한 학습알고리즘이 개발되지 않아 발전이 더디게 진행되었다. 그 후, 1986년 Rumelhart, Hinton and Williams는 다층 퍼셉트론을 위한 학습알고리즘으로 입력값에 의한 출력값과 목표값과의 오차를 역으로 전파하여 가중치를 조절하는 역전파 학습 알고리즘을 개발하게 되었으며, 이후 신경망이론에 대한 연구가 다시 활발하게 이루어지기 시작하였다.

인공신경망은 입력변수와 출력변수 사이의 복잡한 관계를 파악하고 높은 예측성과를 얻을 수 있는 장점이 있어, 현재는 대부분의 공학 분야에서 사용되고 있으며, 경제학, 경영학 분야에서도 다수 사용되고 있다.

### 나. 연산 방법

인공신경망 모형의 기본적인 연산과정은 입력자료 (input signal)인  $x$  와 가중치 (synaptic weight) 벡터  $w_i$  의 곱의 형태이며, 이들의 합으로 결합함수 (summing junction)  $\Sigma$ 가 계산된다. 계산된 결합함수는 선형

또는 비선형 형태의 활성화함수를 거쳐 결과를 도출한다.

다층 퍼셉트론은 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 은닉층을 갖는 구조이며, 처리요소들 간의 층간 연결은 전부 정방향으로 연결된다. 다층 퍼셉트론을 계산하는 알고리즘은 역전파 알고리즘이 있으며, 본 연구에서는 역전파 알고리즘을 사용하여 학습을 진행하였다.

### 3.3 회귀모형 편의보정

수문순환 과정은 매우 복잡하게 이루어져 있으며, 이를 해석하기 위해 다양한 수문모형이 사용되고 있으나, 실측치와 비교하여 정확하게 모의하는 것은 불가능하며, 여러 오차가 존재할 수밖에 없다. 이러한 오차를 편의라고 할 수 있으며, 다양한 편의보정 (Bias correction) 방법을 통해 모의치에서 발생하는 오차를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 대표적인 편의보정 방법 중 하나인 분위사상법 (Quantile mapping)을 이용하여 모의치를 편의보정 하고자 한다. 분위사상법은 실측치와 모의치의 경험적인 확률분포를 이용하여 모의치의 누적확률분포를 실측치의 누적확률분포에 사상시키는 방법으로 일반적으로 식 (3-2)와 같이 나타낸다 (Gudmundsson et al., 2012).

$$P_0 = F_0^{-1}(F_m(P_m)) \quad \text{식 (3-2)}$$

여기서,  $F_m$ 은 실측치의 누적확률분포를,  $P_m$ 은 모의치의 누적확률분포를,  $P_0$ 와  $F_0$ 는 사상된 모의치와 실측치를 말한다.

분위사상법을 적용하기 위해서는 실측치에 적합한 누적확률분포를 택해야 한다. 오염부하량은 기존 문헌에서 제시된 다양한 확률분포로는 설명하기 어렵다고 생각하여, 본 연구에서는 연구대상지의 실측치를 이용하여 확률분포를 만들어 사용하였다.

## 제 4 장 대상유역 및 자료구축

### 4.1 대상유역 및 수문·수질자료 구축

유역특성을 고려한 LOADEST 모형회귀변수 추정방법 개발을 위해 수질오염총량관리제도가 실시되는 단위유역을 대상유역으로 선정하였다. 대상유역은 수계별로 한강수계 36개, 금강수계 16개, 낙동강수계 23개, 영산강수계 6개로 총 81개의 유역을 선정하였다. 또한, 개발된 회귀식의 적용성 평가를 위해 총 4개 유역을 선정하여 검증을 실시하였다.

대상유역의 유출량 및 수질자료는 환경부 물환경정보시스템 (Water Information System, WIS)을 통해 수질오염총량제가 실시된 2004년부터 7 ~ 10일 단위로 측정된 자료를 수집하였으며, 유역별로 최소 329개에서 최대 497개의 자료를 이용하였다. Fig. 4.1은 대상유역의 유량 및 수질측정망의 위치를 나타내고 있다.

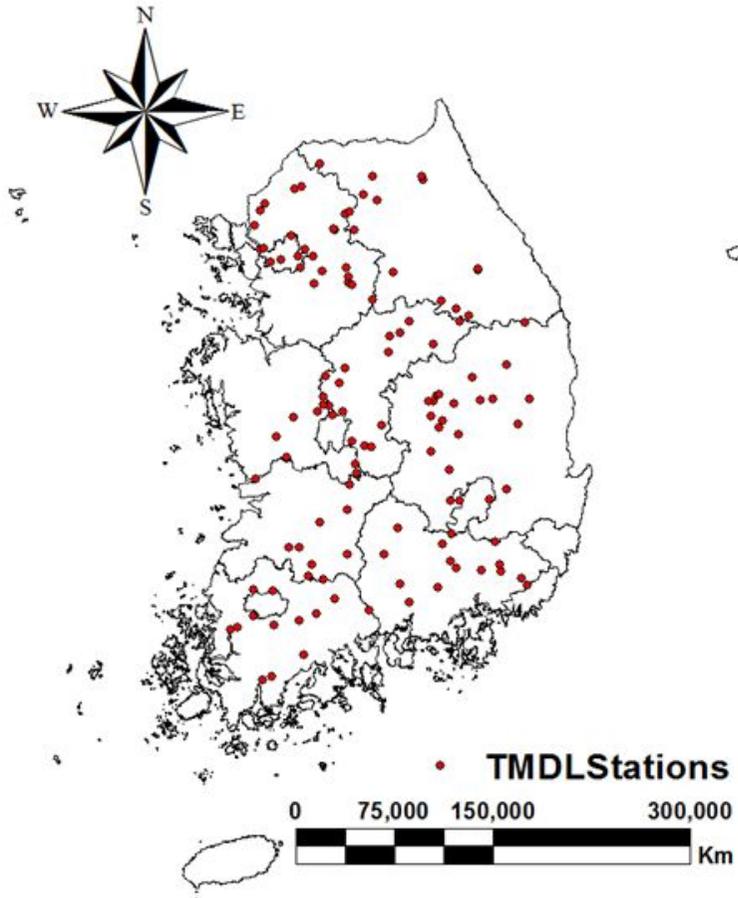


Fig. 4.1 Location map of the study watersheds

## 4.2 지형자료 구축

LOADEST 모형 회귀변수 추정에 사용될 유역특성 추출을 위해 1:25,000 국토지리정보원 수치지도와 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여, 유역특성 자료와 토지이용현황을 구축하였다. 구축된 자료는 Table 4.1과 같다.dz

Table 4.1 Characteristics and land use of the study watersheds

| Watershed | Area (km <sup>2</sup> ) | Flow length (km) | Paddy (%) | Upland (%) | Forest (%) | Impervious area (%) |
|-----------|-------------------------|------------------|-----------|------------|------------|---------------------|
| 갑천A       | 649.9                   | 58.30            | 8.5       | 7.1        | 59.3       | 8.9                 |
| 금본A       | 290.2                   | 32.98            | 13.0      | 11.8       | 62.8       | 1.8                 |
| 금본B       | 929.1                   | 61.44            | 10.9      | 9.9        | 70.2       | 1.5                 |
| 금본C       | 1531.7                  | 96.02            | 8.5       | 9.1        | 75.0       | 1.3                 |
| 금본D       | 1857.3                  | 117.31           | 9.5       | 9.8        | 73.1       | 1.5                 |
| 금본E       | 2857.9                  | 153.46           | 9.3       | 8.8        | 73.7       | 1.5                 |
| 금본G       | 4901.2                  | 267.06           | 10.0      | 8.6        | 69.7       | 2.7                 |
| 금본H       | 6857.2                  | 276.79           | 13.4      | 10.0       | 63.8       | 3.3                 |
| 금본J       | 8171.9                  | 328.49           | 14.0      | 9.7        | 63.9       | 3.1                 |
| 금본L       | 9713.0                  | 403.58           | 17.4      | 9.7        | 60.1       | 3.2                 |
| 논산A       | 486.7                   | 59.71            | 26.8      | 10.2       | 52.0       | 3.1                 |
| 미호B       | 1604.7                  | 74.61            | 22.2      | 13.5       | 49.0       | 4.7                 |
| 미호C       | 1847.1                  | 83.73            | 21.9      | 13.4       | 49.2       | 4.7                 |
| 병천A       | 243.2                   | 31.11            | 17.2      | 11.0       | 61.2       | 3.2                 |
| 유등A       | 37.3                    | 13.49            | 6.9       | 5.8        | 84.6       | 0.5                 |
| 초강A       | 630.8                   | 64.52            | 10.2      | 8.1        | 74.7       | 1.2                 |
| 감천A       | 861.1                   | 60.32            | 13.8      | 8.7        | 66.7       | 2.7                 |
| 금천A       | 9.1                     | 6.07             | 51.1      | 12.5       | 21.7       | 3.5                 |
| 금호A       | 942.9                   | 64.05            | 8.6       | 7.0        | 70.5       | 2.0                 |
| 금호B       | 1479.6                  | 81.75            | 9.3       | 7.2        | 64.3       | 3.2                 |
| 금호C       | 2101.9                  | 116.59           | 8.6       | 6.2        | 63.7       | 5.3                 |
| 길안A       | 322.0                   | 39.38            | 2.7       | 6.9        | 81.3       | 0.9                 |
| 낙본A       | 196.4                   | 31.07            | 0.0       | 5.0        | 86.5       | 2.5                 |
| 낙본C       | 4429.8                  | 216.05           | 4.8       | 8.9        | 77.9       | 1.3                 |
| 낙본D       | 9364.9                  | 270.91           | 10.2      | 8.8        | 71.4       | 1.7                 |
| 낙본E       | 10748.3                 | 336.10           | 11.0      | 8.8        | 70.1       | 1.9                 |
| 낙본G       | 14223.1                 | 422.95           | 11.1      | 8.3        | 67.9       | 2.9                 |
| 낙본H       | 16826.3                 | 456.17           | 11.4      | 8.1        | 68.1       | 2.9                 |
| 낙본I       | 18472.0                 | 497.08           | 11.9      | 8.3        | 67.0       | 3.1                 |

Table 4.1 Characteristics and land use of the study watersheds  
(continued)

| Watershed | Area (km <sup>2</sup> ) | Flow length (km) | Paddy (%) | Upland (%) | Forest (%) | Impervious area (%) |
|-----------|-------------------------|------------------|-----------|------------|------------|---------------------|
| 낙본J       | 18951.8                 | 515.85           | 12.2      | 8.3        | 66.5       | 3.3                 |
| 남강A       | 1007.7                  | 56.44            | 13.3      | 5.9        | 73.6       | 1.5                 |
| 남강B       | 1690.3                  | 90.92            | 14.2      | 5.5        | 73.1       | 1.6                 |
| 남강D       | 648.3                   | 65.96            | 16.2      | 8.0        | 58.8       | 5.8                 |
| 남강E       | 1148.5                  | 100.66           | 17.0      | 9.2        | 57.6       | 5.9                 |
| 내성A       | 914.4                   | 66.02            | 12.2      | 9.5        | 64.9       | 2.2                 |
| 밀양B       | 1402.3                  | 92.30            | 9.0       | 5.2        | 71.7       | 2.7                 |
| 황강A       | 46.3                    | 13.15            | 31.6      | 6.2        | 51.5       | 4.5                 |
| 황강B       | 1302.9                  | 110.50           | 14.0      | 6.5        | 69.9       | 2.0                 |
| 회천A       | 461.0                   | 37.80            | 13.4      | 7.9        | 69.9       | 1.9                 |
| 섬본C       | 1439.0                  | 119.24           | 14.5      | 9.2        | 67.2       | 1.8                 |
| 영본B       | 1983.5                  | 68.77            | 18.5      | 8.9        | 55.3       | 6.4                 |
| 영본C       | 2362.0                  | 93.82            | 20.6      | 10.7       | 51.6       | 6.1                 |
| 영본D       | 2599.5                  | 99.21            | 21.5      | 11.3       | 50.5       | 5.9                 |
| 오수A       | 370.9                   | 45.63            | 23.3      | 9.0        | 59.4       | 2.1                 |
| 요천A       | 160.9                   | 26.47            | 5.1       | 3.4        | 84.8       | 1.0                 |
| 경안A       | 206.4                   | 27.69            | 8.5       | 8.6        | 59.7       | 8.3                 |
| 경안B       | 465.3                   | 40.09            | 8.3       | 8.2        | 62.8       | 7.6                 |
| 골지A       | 960.5                   | 90.77            | 1.2       | 8.9        | 84.8       | 0.7                 |
| 공룡A       | 146.2                   | 30.15            | 18.3      | 4.7        | 57.6       | 5.6                 |
| 달천A       | 971.7                   | 110.42           | 7.9       | 10.4       | 76.0       | 1.3                 |
| 달천B       | 1469.1                  | 170.49           | 9.9       | 11.4       | 70.2       | 1.8                 |
| 북하A       | 305.5                   | 38.60            | 29.5      | 13.3       | 39.5       | 6.0                 |
| 북한A       | 693.2                   | 68.47            | 7.0       | 1.3        | 82.9       | 1.6                 |
| 북한B       | 1418.0                  | 97.19            | 5.4       | 2.5        | 84.9       | 1.5                 |
| 북한C       | 4409.8                  | 186.19           | 3.7       | 3.2        | 86.3       | 1.3                 |
| 북한D       | 6499.7                  | 223.02           | 4.5       | 3.7        | 85.5       | 1.2                 |
| 섬강A       | 716.7                   | 63.68            | 9.6       | 6.3        | 79.2       | 1.4                 |
| 섬강B       | 1482.1                  | 99.24            | 10.2      | 6.6        | 75.7       | 2.2                 |

Table 4.1 Characteristics and land use of the study watersheds  
(continued)

| Watershed | Area<br>(km <sup>2</sup> ) | Flow<br>length (km) | Paddy<br>(%) | Upland<br>(%) | Forest<br>(%) | Impervious<br>area (%) |
|-----------|----------------------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|------------------------|
| 소양A       | 1080.5                     | 90.80               | 1.9          | 3.4           | 92.6          | 0.3                    |
| 신천A       | 344.6                      | 38.73               | 17.8         | 7.7           | 59.8          | 3.7                    |
| 양화A       | 181.9                      | 32.06               | 33.4         | 24.5          | 25.2          | 4.7                    |
| 영평A       | 556.3                      | 45.92               | 13.6         | 7.7           | 65.8          | 3.8                    |
| 오대A       | 451.4                      | 62.52               | 1.6          | 5.7           | 89.8          | 0.6                    |
| 옥동A       | 471.9                      | 53.00               | 0.7          | 4.4           | 92.9          | 0.4                    |
| 왕숙A       | 272.4                      | 38.82               | 7.2          | 11.8          | 63.0          | 5.7                    |
| 인북A       | 735.0                      | 57.27               | 3.1          | 2.4           | 90.6          | 0.8                    |
| 제천A       | 462.7                      | 42.53               | 10.9         | 6.4           | 75.4          | 2.5                    |
| 조중A       | 258.0                      | 40.22               | 3.4          | 7.4           | 82.1          | 1.3                    |
| 주천A       | 599.4                      | 89.43               | 5.8          | 7.8           | 82.7          | 0.8                    |
| 중랑A       | 122.6                      | 18.16               | 9.7          | 5.0           | 60.3          | 10.7                   |
| 탄천A       | 106.8                      | 26.56               | 4.2          | 14.2          | 91.9          | 17.1                   |
| 평창A       | 1766.1                     | 143.74              | 4.0          | 8.9           | 82.8          | 0.9                    |
| 한강B       | 5524.5                     | 246.70              | 2.2          | 8.3           | 84.9          | 0.9                    |
| 한강C       | 6626.7                     | 305.87              | 2.8          | 8.3           | 83.4          | 1.0                    |
| 한강E       | 11580.9                    | 399.54              | 8.0          | 9.4           | 74.5          | 1.7                    |
| 한강F       | 19975.4                    | 441.75              | 6.8          | 7.3           | 77.8          | 1.8                    |
| 한강G       | 20417.5                    | 456.61              | 6.9          | 7.5           | 77.3          | 1.9                    |
| 한강H       | 21112.5                    | 479.73              | 6.7          | 7.4           | 76.2          | 2.6                    |
| 한강I       | 21587.7                    | 496.83              | 6.7          | 7.3           | 75.2          | 3.2                    |
| 홍천A       | 1524.0                     | 135.06              | 6.9          | 5.1           | 83.9          | 1.1                    |
| 흑천A       | 307.0                      | 40.16               | 10.3         | 7.0           | 75.0          | 2.4                    |

## 제 5 장 LOADEST 기반 오염부하량 추정 회귀모형 개발

### 5.1 유역별 오염부하량 추정 회귀모형 구축

LOADEST를 이용하여 유역별로 T-N, T-P 오염부하량 추정 회귀모형을 구축하였다. 회귀모형의 구축에는 2004년부터 2014년까지의 유량 자료와 수질자료를 입력 자료로 사용하였으며, 이상치는 보정을 하였다. 회귀모형의 매개변수는 입력 자료가 보정되었기 때문에, AMLE 방법으로 결정된 매개변수를 사용하였으며, 부하량 모의결과 모의치와 실측치 간의 잔차가 정규분포를 이루지 않는 경우에 대해 LAD 방법에 의해 결정된 매개변수를 사용하였다.

회귀모형에 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 사용하였다.

결정계수는 실측치와 모의치의 유사성을 나타내는 지표로, 0 ~ 1의 범위에 있으며, 모의치가 실측치의 경향성을 잘 반영할수록 1에 가까운 수치로 나타난다. 그러나 결정계수는 모의치가 실측치와 값의 차이가 크게 나타나더라도 경향성만 반영하면 높은 값을 나타내는 단점이 있다. 식 (5-1)은 결정계수를 정의하는 식이다.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{식 (5-1)}$$

여기서,  $O$ 는 실측치를,  $P$ 는 모의치를,  $\bar{O}$ 와  $\bar{P}$ 는 실측치와 모의치의

평균을 나타낸다.

NSE는 1970년 Nash와 Sutcliffe에 의해 제안된 식으로  $-\infty \sim 1$ 의 범위에 있으며, 1에 가까울수록 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것을 의미한다. 일반적으로 0 ~ 1사이의 값을 가질 경우 모형의 적용성이 있는 것으로 판단된다 (정한석, 2014). 식 (5-2)는 NSE를 정의하는 식이다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{식 (5-2)}$$

RSR은 2004년 Singh 등에 의해 제안된 식으로 RMSE (Root Mean Square Error)가 갖는 한계를 극복하기 위해 제안된 식이다. RMSE는 실측치와 모의치의 정량적 차이를 알 수 있으나, 오차의 정도를 파악하는데 한계가 있어 이를 표준화하여 나타내는 것이 필요하다. RSR은 이러한 RMSE를 표준화 한 것으로 RMSE와 실측치의 표준편차간의 비를 의미한다. RSR의 값이 0이면 모의치가 실측치를 완벽하게 모의한 것이며, 값이 낮을수록 모의가 잘 된 것으로 판단할 수 있다. RSR은 식 (5-3)과 같이 정의된다.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]} \quad \text{식 (5-3)}$$

PBIAS는 실측치 대비 모의치의 과대 또는 과소 추정의 경향성을 의미하며, 0일 때 최적 값이며, 값이 낮을수록 모형의 모의가 정확함을 의미한다. PBIAS는 식 (5-4)와 같이 정의된다.

$$PBIAS = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100]}{[\sum_{i=1}^n O_i]} \quad \text{식 (5-4)}$$

위의 통계적 변량에 대한 모형의 적합성은 Table 5.1의 Moriasi et al. (2007)가 제안한 월단위 모의에 대한 기준을 사용하였다. 일반적으로 월단위에 비해 일단위 모의 결과가 실측치를 잘 반영하지 못하므로 본 연구에서는 좀 더 낮은 통계적 변량에서도 적용 가능할 것으로 판단하였다.

**Table 5.1 General performance ratings for selected statistics for a monthly time step (Moriassi et al., 2007)**

| Performance rating | NSE                           | RSR                              | PBIAS (%)                     |                               |                               |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                    |                               |                                  | Stream flow                   | Sediment                      | N                             |
| Very good          | $0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$ | $0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$ | $ \text{PBIAS}  < 10$         | $ \text{PBIAS}  < 15$         | $ \text{PBIAS}  < 25$         |
| Good               | $0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$ | $0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$    | $10 \leq  \text{PBIAS}  < 15$ | $15 \leq  \text{PBIAS}  < 30$ | $25 \leq  \text{PBIAS}  < 40$ |
| Satisfactory       | $0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$ | $0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$    | $15 \leq  \text{PBIAS}  < 25$ | $30 \leq  \text{PBIAS}  < 55$ | $40 \leq  \text{PBIAS}  < 70$ |
| Unsatisfactory     | $\text{NSE} \leq 0.50$        | $\text{RSR} > 0.70$              | $ \text{PBIAS}  \geq 25$      | $ \text{PBIAS}  \geq 55$      | $ \text{PBIAS}  \geq 70$      |

### 5.1.1. T-N 부하량 추정 회귀모형 구축

#### 가. T-N 부하량 추정 회귀모형

LOADEST는 9개의 회귀식을 제공하고 있으며, 회귀식의 독립변수는 로그로 치환된 유량과 측정시간의 조합으로 이루어져 있다. 또한 측정시간은 sin 및 cos 함수와의 결합을 통해 계절적 변동 (Seasonality)을 나타내는 변수로써 포함된다. 본 연구에서는 9개의 모형을 이용하여 모의를 진행하였으며, 모의결과 9개의 식 모두  $R^2$ 와 NSE 값을 통해 비교적 실측치를 잘 반영하여 모의되는 것으로 나타났다. 산정된 회귀식의 매개변수와 유역별 특성 및 토지이용간의 상관분석 결과 sin(dtime)과 cos(dtime)항의 매개변수는 서로 연관이 없는 것으로 나타나, 두 항이 포함되지 않은 회귀식을 이용하였다. Sin 및 cos 항이 포함되지 않은 식은 1, 2, 3, 5번이 있으며, 그 중 통계적 변량을 통해 결과가 가장 적합하게 나온 5번식을 T-N 부하량 모의를 위한 회귀식으로 선택하였다. 국내에서 LOADEST 모형 회귀식 적용사례로는 박윤식 등 (2015)이 한강 유역에 LOADEST 모형을 적용하여 부유사 모의를 하였으며, 회귀식 1번과 3번의 적용성이 높다고 평가한바 있다.

#### 나. 회귀모형 매개변수 결정

선택된 회귀식의 매개변수를 결정하기 위해 대상유역의 유량 및 수질 자료를 구축하고, LOADEST 모형을 이용하여 오염부하량을 모의하고 최적 매개변수를 결정하였다. Fig. 5.1은 연구대상지 전체 유역의 T-N 부하량 모의치와 실측치의 산포도를 나타내고 있으며, Table 5.2는 유역별 T-N 회귀식의 최적 매개변수와 모의된 오염부하량을 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다.

오염부하량 모의결과,  $R^2$ 는 0.65 ~ 0.99, NSE는 0.01 ~ 0.99, RSR은 0.12 ~ 0.97, PBIAS는 -86.46 ~ 16.77의 범위로 나타나 대부분의 유역에서 모의치가 실측치 경향성을 유지하고, 잘 모의되는 것으로 나타났다. Moriasi et al. (2007)에 따르면 월 단위 유출량 자료의 모의시

NSE가 0.50 이상, RSR이 0.70 이하일 때, 모의결과가 만족스럽다고 보고한바 있으며, 일반적으로 모형의 모의결과는 시간간격이 짧을수록 모의치가 통계적 변량이 낮게 나타나기 때문에 (Engel et al., 2007), 본 연구에서는 일 단위의 수질자료에 대해 통계적 변량을 산정하였으므로 보다 낮은 통계적 변량으로도 모형이 실측치를 잘 반영하였다고 판단하였다. 한편, 박윤식 등 (2015)은 LOADEST 모형을 이용하여 부유사 모의결과 회귀식 1, 3번을 적용할 때 실측치와 가장 유사하게 모의되는 것으로 나타나며, 이 때 회귀식 1번의  $R^2$ 은 0.11 ~ 0.99, NSE는 -1.33 ~ 0.99로 나타나며, 3번은  $R^2$  0.13 ~ 0.99, NSE -1.74 ~ 0.99로 나타난다고 보고한바 있다.

또한, LOADEST에 의한 T-N 부하량 추정결과 모의치는 실측치에 비해 과소모의 되는 것으로 나타났으며, 이는 Morse et al. (2014)에 의해서 보고된바 있다.

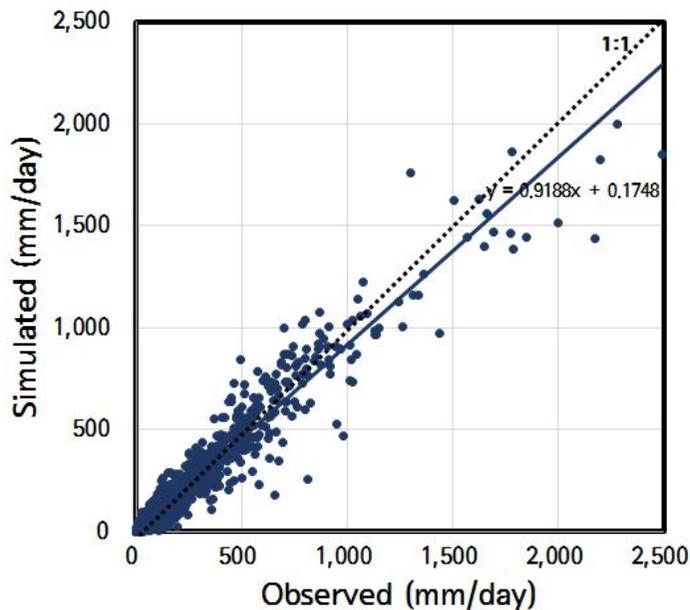


Fig. 5.1 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the simulated from the study watersheds

Table 5.2 LOADEST Model T-N coefficients of the study watersheds

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |       |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|-------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS |
| 감천A       | 9.6782             | 0.7348         | 0.0395         | -0.0632        | 0.63           | 0.58 | 0.65 | -8.72 |
| 금본A       | 7.4088             | 0.9327         | 0.0099         | -0.0284        | 0.96           | 0.96 | 0.21 | -3.30 |
| 금본B       | 7.8858             | 1.0502         | -0.0163        | -0.0086        | 0.98           | 0.97 | 0.17 | -2.43 |
| 금본C       | 8.4792             | 1.0991         | -0.0303        | -0.0198        | 0.93           | 0.92 | 0.27 | -1.85 |
| 금본D       | 8.9712             | 1.0451         | 0.0113         | -0.0221        | 0.93           | 0.93 | 0.27 | -0.81 |
| 금본E       | 9.3336             | 1.1069         | -0.0485        | -0.0246        | 0.94           | 0.93 | 0.27 | -3.22 |
| 금본G       | 10.1322            | 0.7745         | 0.0273         | -0.0750        | 0.70           | 0.69 | 0.56 | -4.47 |
| 금본H       | 10.5378            | 0.7760         | 0.1133         | -0.0557        | 0.76           | 0.76 | 0.49 | -4.71 |
| 금본J       | 10.7079            | 0.8515         | 0.0289         | -0.0751        | 0.76           | 0.76 | 0.49 | -6.07 |
| 금본L       | 10.9088            | 0.9191         | 0.0100         | -0.0689        | 0.85           | 0.85 | 0.39 | -4.95 |
| 논산A       | 8.5100             | 0.8999         | 0.0292         | -0.0841        | 0.97           | 0.94 | 0.24 | -8.24 |
| 미호B       | 9.8146             | 0.8206         | 0.0470         | -0.0441        | 0.90           | 0.90 | 0.32 | -5.71 |
| 미호C       | 9.7946             | 0.8136         | 0.0559         | -0.0250        | 0.84           | 0.84 | 0.41 | -6.01 |
| 병천A       | 6.8061             | 0.9703         | -0.0054        | -0.0119        | 0.79           | 0.78 | 0.47 | -8.59 |
| 유등A       | 6.0607             | 1.1102         | 0.0070         | -0.0423        | 0.86           | 0.83 | 0.41 | -6.16 |
| 초강A       | 7.1599             | 1.0668         | -0.0128        | -0.0327        | 0.96           | 0.95 | 0.22 | -2.46 |
| 감천A       | 7.9011             | 0.9275         | -0.0094        | -0.0096        | 0.99           | 0.96 | 0.20 | -6.00 |
| 금천A       | 6.2645             | 1.0084         | 0.0198         | 0.0191         | 0.92           | 0.91 | 0.31 | -5.83 |
| 금호A       | 8.0712             | 1.0445         | 0.0144         | 0.0296         | 0.91           | 0.66 | 0.58 | 9.59  |
| 금호B       | 8.5396             | 1.1156         | -0.0331        | 0.0722         | 0.98           | 0.98 | 0.15 | -0.94 |
| 금호C       | 9.9264             | 0.8269         | 0.0206         | 0.0233         | 0.97           | 0.97 | 0.17 | -1.77 |
| 길안A       | 6.1927             | 1.1346         | -0.0152        | -0.0021        | 0.96           | 0.96 | 0.19 | 0.91  |
| 낙본A       | 7.0980             | 0.8293         | 0.0874         | 0.0127         | 0.91           | 0.86 | 0.38 | 5.05  |
| 낙본C       | 9.3795             | 0.9620         | 0.0237         | 0.0083         | 0.78           | 0.76 | 0.49 | -4.15 |
| 낙본D       | 10.0681            | 1.0199         | 0.0152         | 0.0124         | 0.97           | 0.97 | 0.18 | -2.73 |
| 낙본E       | 10.2061            | 0.9658         | 0.0123         | 0.0034         | 0.97           | 0.97 | 0.19 | -3.35 |
| 낙본G       | 10.4688            | 0.8973         | -0.0036        | -0.0067        | 0.96           | 0.94 | 0.24 | -5.64 |

Table 5.2 LOADEST Model T-N coefficients of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 낙본H       | 10.9564            | 0.9272         | 0.0134         | 0.0047         | 0.97           | 0.97 | 0.17 | -2.04  |
| 낙본I       | 11.2238            | 0.9269         | 0.0260         | 0.0104         | 0.99           | 0.99 | 0.12 | -1.98  |
| 낙본J       | 11.2408            | 0.9412         | 0.0065         | 0.0020         | 0.98           | 0.98 | 0.14 | -2.42  |
| 남강A       | 8.0194             | 0.9981         | -0.0142        | 0.0244         | 0.93           | 0.89 | 0.34 | -6.34  |
| 남강B       | 8.4698             | 1.0758         | -0.0242        | 0.0219         | 0.95           | 0.78 | 0.47 | -16.68 |
| 남강D       | 8.8622             | 0.7233         | 0.0908         | 0.0106         | 0.93           | 0.92 | 0.28 | -3.22  |
| 남강E       | 8.9876             | 0.7921         | 0.0801         | 0.0163         | 0.92           | 0.92 | 0.29 | -3.58  |
| 내성A       | 8.4351             | 0.9333         | 0.0125         | 0.0089         | 0.98           | 0.98 | 0.15 | -1.27  |
| 밀양B       | 8.1034             | 1.0061         | 0.0220         | -0.0191        | 0.97           | 0.92 | 0.29 | 4.29   |
| 황강A       | 7.6156             | 0.9682         | 0.0204         | 0.0252         | 0.96           | 0.96 | 0.21 | -2.49  |
| 황강B       | 8.1212             | 1.1188         | -0.0380        | 0.0216         | 0.92           | 0.91 | 0.29 | -2.16  |
| 회천A       | 7.5112             | 1.0523         | -0.0326        | 0.0105         | 0.93           | 0.88 | 0.35 | -11.41 |
| 섬본C       | 7.9226             | 1.0881         | -0.0433        | 0.0120         | 0.96           | 0.62 | 0.61 | -48.37 |
| 영본B       | 9.6859             | 0.6662         | -0.0132        | -0.0566        | 0.74           | 0.69 | 0.56 | 16.77  |
| 영본C       | 9.2496             | 0.8477         | -0.0204        | -0.0643        | 0.74           | 0.11 | 0.94 | -50.84 |
| 영본D       | 9.3819             | 0.8835         | -0.0170        | -0.0509        | 0.81           | 0.34 | 0.81 | -47.72 |
| 오수A       | 6.8595             | 1.1150         | -0.0520        | 0.0114         | 0.98           | 0.01 | 1.00 | -86.46 |
| 요천A       | 5.7142             | 1.0045         | 0.0032         | 0.0200         | 0.96           | 0.32 | 0.83 | -78.46 |
| 경안A       | 7.9665             | 0.7304         | 0.0167         | -0.0555        | 0.91           | 0.90 | 0.31 | -3.87  |
| 경안B       | 8.4906             | 0.8018         | 0.0422         | -0.0392        | 0.95           | 0.94 | 0.24 | -3.21  |
| 골지A       | 8.1064             | 1.0237         | -0.0031        | 0.0026         | 0.97           | 0.97 | 0.17 | -0.16  |
| 공릉A       | 8.0302             | 0.7184         | 0.0839         | -0.0411        | 0.92           | 0.91 | 0.31 | -2.23  |
| 달천A       | 8.1268             | 1.0856         | -0.0161        | 0.0190         | 0.94           | 0.93 | 0.27 | -3.56  |
| 달천B       | 8.7331             | 1.0550         | 0.0115         | 0.0082         | 0.95           | 0.94 | 0.24 | -1.05  |
| 북하A       | 8.1932             | 0.7683         | 0.0025         | 0.0176         | 0.87           | 0.87 | 0.37 | -3.12  |
| 북한A       | 8.0585             | 0.9917         | 0.0095         | 0.0180         | 0.94           | 0.94 | 0.25 | -2.26  |
| 북한B       | 8.5453             | 1.0543         | 0.0043         | 0.0174         | 0.93           | 0.92 | 0.28 | -1.20  |

Table 5.2 LOADEST Model T-N coefficients of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |       |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|-------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS |
| 북한C       | 9.5603             | 0.9729         | -0.0025        | 0.0114         | 0.96           | 0.95 | 0.22 | -2.47 |
| 북한D       | 10.2470            | 1.0396         | 0.0028         | 0.0087         | 0.96           | 0.96 | 0.20 | -1.19 |
| 섬강A       | 7.7937             | 1.0359         | -0.0116        | 0.0059         | 0.97           | 0.96 | 0.19 | -0.77 |
| 섬강B       | 8.8165             | 0.8763         | 0.0355         | -0.0206        | 0.94           | 0.94 | 0.25 | -1.91 |
| 소양A       | 8.1446             | 1.0153         | -0.0040        | 0.0253         | 0.93           | 0.93 | 0.27 | -1.94 |
| 신천A       | 8.9879             | 0.6512         | 0.0597         | -0.0255        | 0.90           | 0.89 | 0.33 | -2.12 |
| 양화A       | 7.2358             | 0.9283         | 0.0267         | -0.0027        | 0.92           | 0.91 | 0.29 | -5.56 |
| 영평A       | 8.7190             | 0.8873         | -0.0132        | 0.0062         | 0.94           | 0.93 | 0.26 | -3.62 |
| 오대A       | 7.9027             | 0.9488         | 0.0006         | 0.0047         | 0.94           | 0.94 | 0.24 | -2.51 |
| 옥동A       | 6.7320             | 0.9922         | 0.0119         | 0.0108         | 0.93           | 0.90 | 0.32 | 0.32  |
| 왕숙A       | 8.8983             | 0.7065         | 0.1295         | -0.0320        | 0.88           | 0.65 | 0.59 | -0.13 |
| 인북A       | 7.8188             | 0.9373         | 0.0003         | 0.0217         | 0.88           | 0.87 | 0.35 | -4.07 |
| 제천A       | 8.0557             | 0.9329         | -0.0078        | -0.0102        | 0.95           | 0.94 | 0.24 | -3.09 |
| 조종A       | 7.0411             | 0.9947         | 0.0040         | -0.0200        | 0.96           | 0.95 | 0.23 | -4.13 |
| 주천A       | 7.8528             | 0.9582         | 0.0082         | -0.0009        | 0.93           | 0.92 | 0.29 | 0.54  |
| 중탕A       | 8.2779             | 0.6106         | 0.0994         | -0.0743        | 0.96           | 0.95 | 0.22 | -1.71 |
| 탄천A       | 9.2356             | 0.5581         | 0.1063         | -0.0833        | 0.98           | 0.89 | 0.32 | -5.66 |
| 평창A       | 8.9645             | 1.0139         | -0.0021        | -0.0090        | 0.92           | 0.90 | 0.31 | 0.05  |
| 한강B       | 9.7795             | 1.0279         | 0.0101         | -0.0055        | 0.93           | 0.91 | 0.31 | -0.07 |
| 한강C       | 10.7104            | 1.0542         | -0.0318        | 0.0109         | 0.96           | 0.96 | 0.19 | -1.07 |
| 한강E       | 10.8611            | 1.0080         | -0.0060        | 0.0051         | 0.97           | 0.97 | 0.18 | -1.74 |
| 한강F       | 11.6090            | 1.0162         | 0.0159         | 0.0076         | 0.96           | 0.96 | 0.20 | -1.14 |
| 한강G       | 11.6162            | 1.0014         | 0.0131         | 0.0022         | 0.96           | 0.95 | 0.21 | -2.01 |
| 한강H       | 11.9686            | 0.7376         | 0.0633         | -0.0221        | 0.92           | 0.91 | 0.30 | -2.68 |
| 한강I       | 12.2674            | 0.6621         | 0.0950         | -0.0296        | 0.92           | 0.91 | 0.30 | -2.62 |
| 홍천A       | 8.5965             | 1.0007         | -0.0106        | 0.0073         | 0.96           | 0.96 | 0.21 | -2.72 |
| 흑천A       | 6.9646             | 1.0085         | -0.0070        | -0.0061        | 0.94           | 0.94 | 0.25 | -5.12 |

## 5.1.2 T-P 부하량 추정 회귀모형 구축

가. T-P 부하량 추정 회귀식

T-N과 동일하게 sin 및 cos항이 포함되지 않은 1, 2, 3, 5 회귀식을 대상으로 모의를 진행하였으며, 통계적 변량을 통해 모의결과가 가장 적합하게 나타난 3번 회귀식을 T-P 부하량 모의를 위한 회귀식으로 선정하였다.

나. 회귀식 매개변수 결정

Fig. 5.2는 연구대상지 전체 구역의 T-N 부하량 모의치와 실측치의 산포도를 나타내고 있으며, Table 5.3은 구역별 T-P 회귀식의 최적매개변수와 모의된 오염부하량을 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의결과 통계적 변량은  $R^2$  0.42 ~ 0.96로, NSE 0.22 ~ 0.91, RSR 0.30 ~ 0.88, PBIAS -65.05 ~ -2.13으로 나타나, 일부 구역에서 다소 낮은 통계적 변량을 나타내었으나, 선행연구 (Moriassi et al., 2007; 박윤식 등, 2015)를 통해 모의결과가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 구역별로 추정된 최적매개변수를 적용하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

한편, T-N과 마찬가지로 실측치에 비해 모든 구역에서 과소모의 되는 것으로 나타났으며, 차이가 크게 나타나 보다 정확한 모의를 위해서는 모의치의 보정이 필요할 것으로 사료된다.

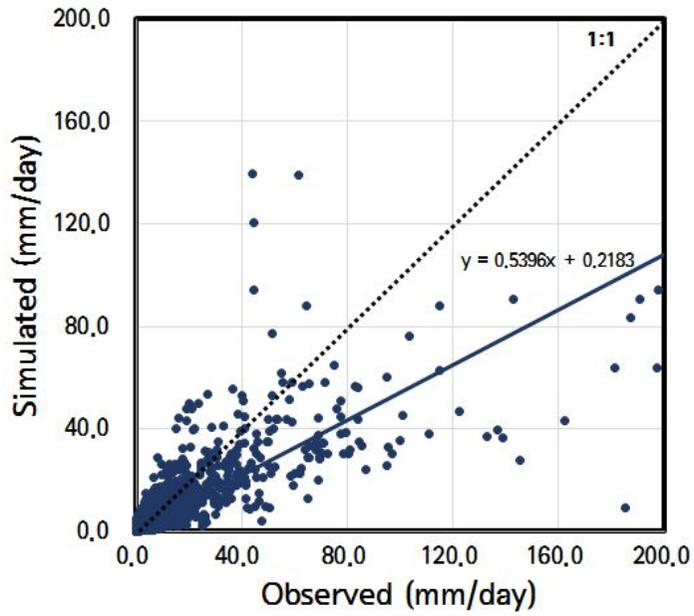


Fig. 5.2 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the simulated from the study watersheds

**Table 5.3 LOADEST Model T-P coefficients of the study watersheds**

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 갑천A       | 6.3140             | 0.8224         | -0.2372        | 0.47           | 0.46 | 0.73 | -10.44 |
| 금본A       | 3.0000             | 1.4889         | -0.0318        | 0.92           | 0.85 | 0.38 | -2.13  |
| 금본B       | 3.4210             | 1.3084         | -0.0301        | 0.83           | 0.82 | 0.42 | -15.40 |
| 금본C       | 4.0973             | 1.3987         | -0.0515        | 0.82           | 0.62 | 0.62 | -32.69 |
| 금본D       | 4.9137             | 1.4527         | -0.0977        | 0.84           | 0.75 | 0.50 | -27.33 |
| 금본E       | 5.2387             | 1.5904         | -0.0778        | 0.84           | 0.84 | 0.40 | -8.52  |
| 금본G       | 6.5971             | 0.8511         | -0.2195        | 0.48           | 0.45 | 0.74 | -11.42 |
| 금본H       | 7.3352             | 1.0448         | -0.1916        | 0.73           | 0.71 | 0.54 | -14.91 |
| 금본J       | 7.3414             | 1.0737         | -0.1850        | 0.66           | 0.64 | 0.60 | -16.46 |
| 금본L       | 7.4542             | 1.1531         | -0.1210        | 0.69           | 0.67 | 0.57 | -15.08 |
| 논산A       | 5.3281             | 1.0432         | -0.0782        | 0.88           | 0.87 | 0.36 | -10.50 |
| 미호B       | 6.6947             | 1.1556         | -0.1859        | 0.69           | 0.68 | 0.57 | -13.17 |
| 미호C       | 6.7098             | 1.1059         | -0.1739        | 0.67           | 0.66 | 0.59 | -21.65 |
| 병천A       | 3.6981             | 1.1017         | -0.0421        | 0.88           | 0.68 | 0.57 | -29.86 |
| 유등A       | 1.3084             | 1.2607         | -0.0388        | 0.75           | 0.33 | 0.82 | -53.18 |
| 초강A       | 2.7842             | 1.2928         | -0.0359        | 0.96           | 0.79 | 0.46 | -37.95 |
| 감천A       | 4.6134             | 0.9184         | -0.1329        | 0.81           | 0.39 | 0.78 | -41.03 |
| 금천A       | 2.6439             | 1.2351         | 0.0066         | 0.56           | 0.50 | 0.71 | -31.96 |
| 금호A       | 4.4573             | 1.0293         | -0.0892        | 0.64           | 0.55 | 0.67 | -37.44 |
| 금호B       | 4.7109             | 1.2310         | 0.0069         | 0.82           | 0.77 | 0.48 | -26.65 |
| 금호C       | 6.9021             | 0.7192         | -0.1758        | 0.43           | 0.35 | 0.81 | -20.08 |
| 길안A       | 1.4212             | 1.2542         | -0.0272        | 0.87           | 0.42 | 0.76 | -56.31 |
| 낙본A       | 2.9975             | 0.7615         | -0.0488        | 0.70           | 0.47 | 0.73 | -26.70 |
| 낙본C       | 5.3023             | 1.4508         | -0.0211        | 0.86           | 0.85 | 0.38 | -13.16 |
| 낙본D       | 6.2006             | 1.3839         | -0.0268        | 0.85           | 0.83 | 0.41 | -13.28 |
| 낙본E       | 6.6931             | 1.0669         | -0.0626        | 0.82           | 0.62 | 0.62 | -28.64 |
| 낙본G       | 7.2285             | 1.0036         | -0.1404        | 0.69           | 0.64 | 0.60 | -15.91 |

Table 5.3 LOADEST Model T-P coefficients of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 낙본H       | 7.7290             | 1.0434         | -0.1352        | 0.72           | 0.71 | 0.54 | -16.08 |
| 낙본I       | 7.9707             | 1.0178         | -0.1189        | 0.71           | 0.68 | 0.57 | -19.52 |
| 낙본J       | 7.9381             | 1.0704         | -0.1259        | 0.67           | 0.67 | 0.58 | -12.43 |
| 남강A       | 4.1933             | 1.2180         | -0.0008        | 0.71           | 0.45 | 0.74 | -42.91 |
| 남강B       | 4.6216             | 1.2756         | -0.0142        | 0.95           | 0.49 | 0.71 | -56.79 |
| 남강D       | 5.6530             | 0.8944         | -0.1100        | 0.78           | 0.63 | 0.61 | -22.90 |
| 남강E       | 5.8255             | 0.9854         | -0.0987        | 0.83           | 0.73 | 0.52 | -20.17 |
| 내성A       | 4.8531             | 1.1019         | -0.0987        | 0.71           | 0.63 | 0.61 | -21.30 |
| 밀양B       | 4.5826             | 0.8696         | -0.1520        | 0.80           | 0.60 | 0.64 | -35.67 |
| 황강A       | 4.1556             | 0.8697         | -0.0558        | 0.62           | 0.22 | 0.88 | -65.05 |
| 황강B       | 4.2364             | 1.4041         | 0.0046         | 0.96           | 0.80 | 0.45 | -18.88 |
| 회천A       | 3.7390             | 1.2968         | -0.0298        | 0.78           | 0.78 | 0.47 | -8.15  |
| 섬본C       | 4.2450             | 1.3570         | -0.0083        | 0.42           | 0.30 | 0.83 | -9.17  |
| 영본B       | 6.7403             | 0.7455         | -0.1915        | 0.55           | 0.54 | 0.68 | -9.61  |
| 영본C       | 6.1255             | 0.9759         | -0.1684        | 0.77           | 0.76 | 0.49 | -7.82  |
| 영본D       | 6.1935             | 1.0067         | -0.1579        | 0.65           | 0.65 | 0.60 | -5.20  |
| 오수A       | 3.1425             | 1.3979         | -0.0326        | 0.77           | 0.54 | 0.68 | -38.73 |
| 요천A       | 1.0667             | 1.2139         | -0.0209        | 0.52           | 0.33 | 0.82 | -38.78 |
| 경안A       | 4.6184             | 0.7805         | -0.2097        | 0.59           | 0.59 | 0.64 | -8.05  |
| 경안B       | 5.0250             | 0.8746         | -0.1998        | 0.75           | 0.75 | 0.50 | -7.11  |
| 골지A       | 3.5229             | 1.4066         | -0.0406        | 0.91           | 0.70 | 0.54 | -37.60 |
| 공릉A       | 4.8598             | 0.7768         | -0.0780        | 0.76           | 0.56 | 0.66 | -19.18 |
| 달천A       | 4.0605             | 1.3253         | 0.0275         | 0.93           | 0.85 | 0.38 | -22.48 |
| 달천B       | 5.0226             | 1.2403         | -0.0920        | 0.87           | 0.81 | 0.43 | -20.57 |
| 북하A       | 4.8819             | 1.1388         | -0.1203        | 0.86           | 0.61 | 0.62 | -29.92 |
| 북한A       | 3.7429             | 1.2091         | -0.0368        | 0.57           | 0.35 | 0.81 | -42.43 |
| 북한B       | 4.1493             | 1.1996         | -0.0102        | 0.80           | 0.51 | 0.70 | -35.98 |

Table 5.3 LOADEST Model T-P coefficients of the study watersheds (continued)

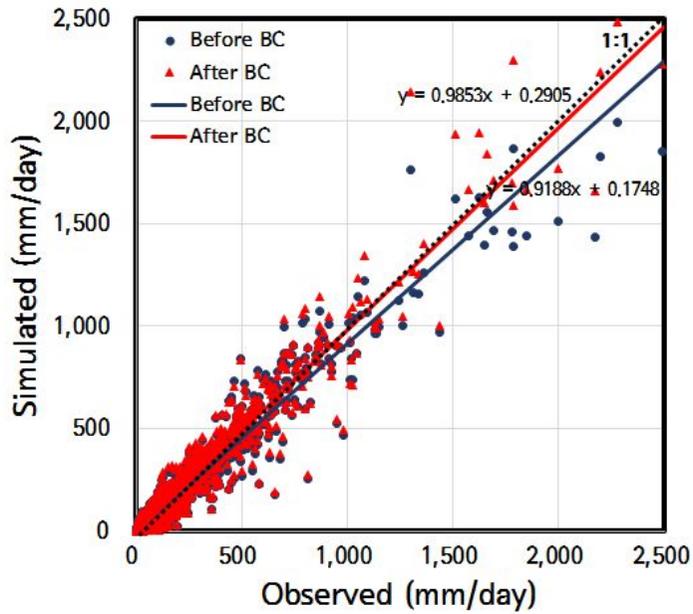
| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 북한C       | 5.3423             | 1.1924         | -0.0534        | 0.83           | 0.47 | 0.73 | -34.30 |
| 북한D       | 5.9439             | 1.2760         | -0.1016        | 0.88           | 0.37 | 0.79 | -47.76 |
| 섬강A       | 3.6128             | 1.3350         | -0.0164        | 0.81           | 0.75 | 0.50 | -19.18 |
| 섬강B       | 5.4754             | 0.7975         | -0.0664        | 0.60           | 0.47 | 0.73 | -23.67 |
| 소양A       | 3.3898             | 1.2706         | 0.0011         | 0.61           | 0.54 | 0.68 | -27.40 |
| 신천A       | 5.8350             | 0.9843         | -0.1710        | 0.46           | 0.30 | 0.83 | -43.04 |
| 양화A       | 4.2902             | 1.3379         | -0.0248        | 0.92           | 0.81 | 0.44 | -25.31 |
| 영평A       | 4.7656             | 0.9678         | -0.0712        | 0.77           | 0.41 | 0.77 | -48.62 |
| 오대A       | 3.5071             | 1.3390         | -0.0484        | 0.48           | 0.32 | 0.82 | -44.36 |
| 옥동A       | 2.0664             | 1.0769         | 0.0093         | 0.55           | 0.32 | 0.82 | -45.05 |
| 왕숙A       | 6.3218             | 1.0203         | -0.1376        | 0.92           | 0.91 | 0.30 | -13.31 |
| 인북A       | 3.4879             | 1.1999         | -0.0113        | 0.58           | 0.34 | 0.81 | -42.69 |
| 제천A       | 4.1449             | 0.9718         | -0.2313        | 0.59           | 0.42 | 0.76 | -27.80 |
| 조종A       | 2.4138             | 1.2074         | -0.0075        | 0.57           | 0.40 | 0.77 | -56.67 |
| 주천A       | 3.1553             | 1.3384         | 0.0061         | 0.76           | 0.62 | 0.62 | -36.29 |
| 중랑A       | 5.4959             | 0.7908         | -0.3002        | 0.88           | 0.88 | 0.34 | -7.96  |
| 탄천A       | 6.6472             | 0.7227         | -0.1788        | 0.88           | 0.58 | 0.65 | -20.62 |
| 평창A       | 4.1556             | 1.3777         | -0.0183        | 0.79           | 0.70 | 0.55 | -31.40 |
| 한강B       | 5.2594             | 1.2489         | -0.0111        | 0.87           | 0.67 | 0.57 | -30.56 |
| 한강C       | 6.2056             | 1.4928         | -0.0366        | 0.53           | 0.48 | 0.72 | -15.62 |
| 한강E       | 7.1220             | 1.3577         | -0.0275        | 0.75           | 0.59 | 0.64 | -30.16 |
| 한강F       | 7.7673             | 1.4106         | -0.0347        | 0.90           | 0.84 | 0.40 | -18.90 |
| 한강G       | 7.8286             | 1.2905         | -0.1010        | 0.92           | 0.86 | 0.37 | -17.28 |
| 한강H       | 8.9143             | 0.6493         | -0.0722        | 0.66           | 0.52 | 0.70 | -14.99 |
| 한강I       | 9.4601             | 0.6227         | -0.0539        | 0.69           | 0.61 | 0.62 | -10.43 |
| 홍천A       | 3.8172             | 1.2553         | 0.0108         | 0.90           | 0.62 | 0.61 | -34.43 |
| 흑천A       | 2.5505             | 1.0978         | -0.0052        | 0.56           | 0.31 | 0.83 | -50.53 |

### 5.1.3 T-N 및 T-P 오염부하량 편익보정

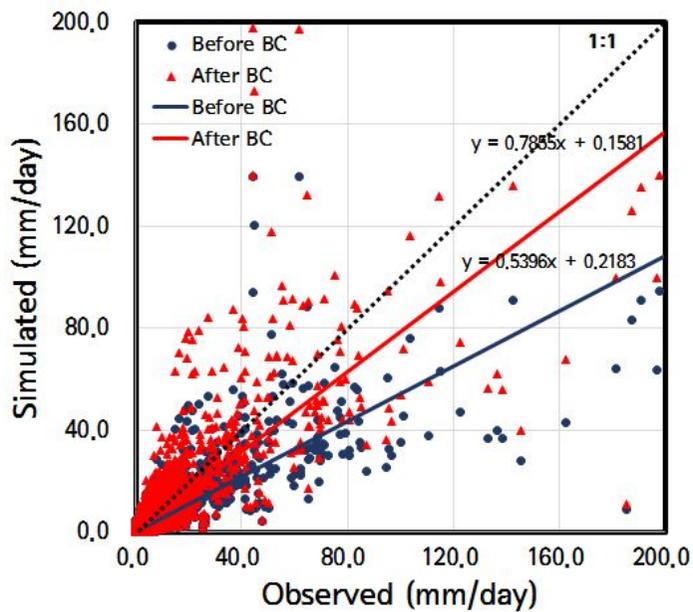
LOADEST의 회귀식은 일반적으로 실측치에 비해 오염부하량을 과소 모의하는 경향이 있는 것으로 보고되고 있으며, 본 연구에서도 실측치에 비해 과소 모의되는 것으로 나타났다. 이와 같이 실측치와 모의치 사이에는 어느 정도의 편의를 보이며, 편익보정 (bias correction)을 통해 모의치의 정확도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 실측치에 비해 과소 모의되는 모의치의 편의를 보정하기 위해 분위사상법 (Quantile mapping)을 이용하였다.

분위사상법을 적용하기 위한 실측치의 확률분포는 경험적 누적확률분포 (empirical CDF)를 이용하였으며, 모든 대상 지역의 실측치와 모의치를 이용하여 편의를 보정하고, 각 지역에 적용하여 모의치를 재 보정하였다.

Fig. 5.3은 81개 지역의 모의치를 편익보정한 결과와 실측치의 산포도를 나타내고 있으며, Fig. 5.4 ~ 5.5는 지역별 편익보정된 모의치와 보정전 모의치의 통계적 변량을 나타내고 있다. T-N, T-P 모두 기존에 비해 상관계수가 증가하여 모의치가 실측치를 더 잘 반영하는 것으로 나타났다. 통계적 변량은 T-N의 경우  $R^2$  0.63 ~ 0.98, NSE 0.06 ~ 0.98, RSR 0.15 ~ 0.97, PBIAS -82.27 ~ 36.02로 나타났으며, T-P는  $R^2$  0.42 ~ 0.96, NSE -0.04 ~ 0.93, RSR 0.26 ~ 1.02, PBIAS -50.97 ~ 32.74로 나타났다. T-N, T-P 모두,  $R^2$ , NSE, RSR은 편익보정 전에 비해 큰 변화가 나타나지 않았으나, PBIAS의 경우 모든 지역에서 증가하여, 편익보정에 의해 모의치가 과소모의 되는 경향이 다소 사라지는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 매개변수 추정방법에 의해 모의된 오염부하량을 분위사상법을 통해 편익보정을 실시하였다.

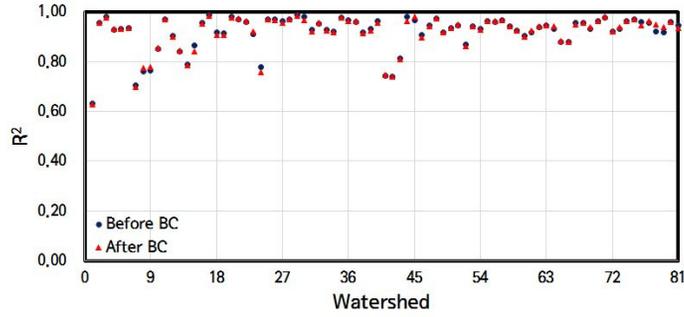


(a) T-N

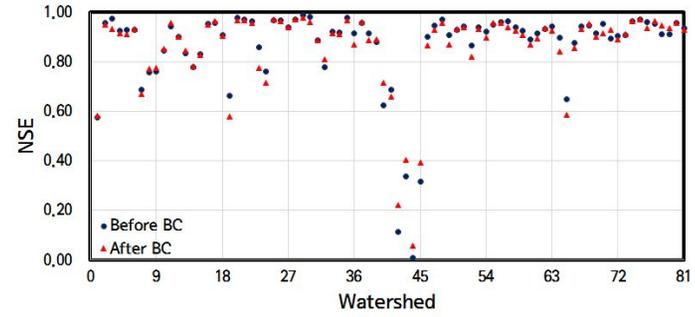


(b) T-P

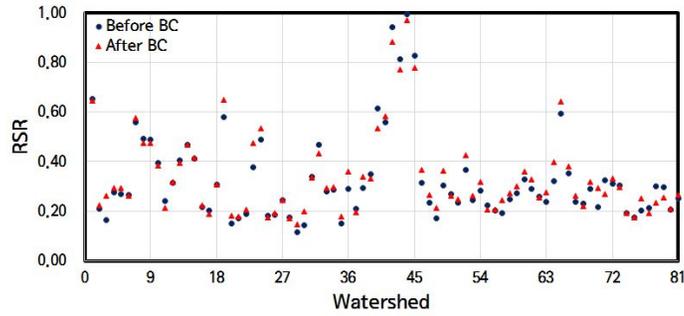
Fig. 5.3 Scatter plots of the observed T-N and T-P pollutant loads against the simulated from the study watersheds



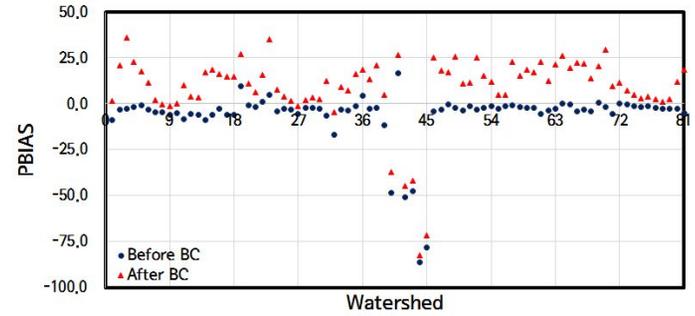
(a)  $R^2$



(b) NSE

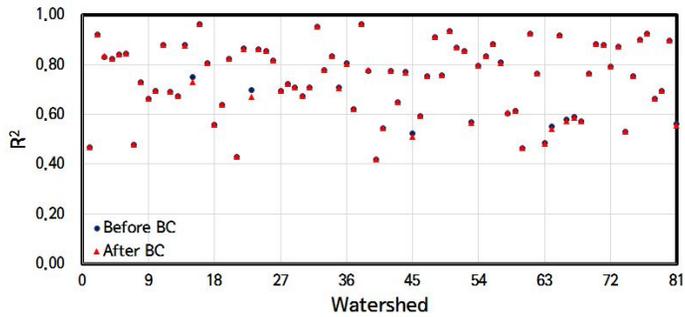


(c) RSR

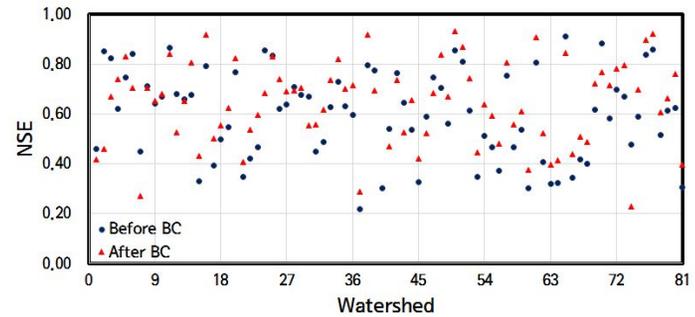


(d) PBIAS

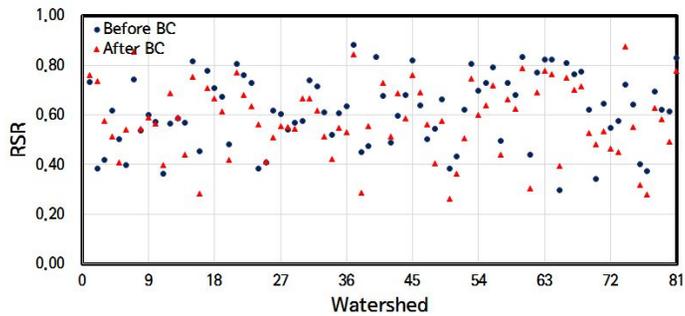
Fig. 5.4 Statistics of the simulated T-N pollutant loads and the bias corrected T-N pollutant loads



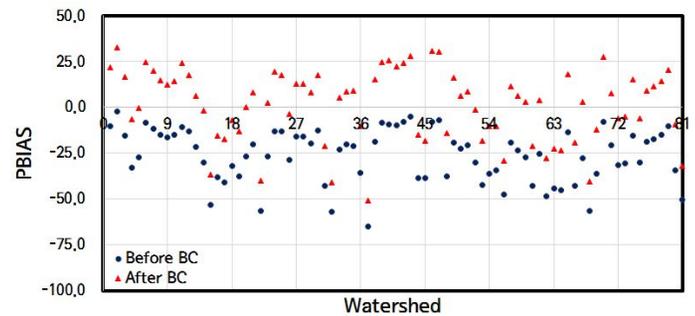
(a)  $R^2$



(b) NSE



(c) RSR



(d) PBIAS

Fig. 5.5 Statistics of the simulated T-P pollutant loads and the bias corrected T-P pollutant loads

## 5.2 다중회귀분석을 이용한 회귀식 매개변수 추정

### 5.2.1 T-N 회귀식 매개변수 추정

유역특성을 고려한 회귀식 매개변수 추정을 위해 유역특성인자를 독립변수로, LOADEST에 의해 결정된 회귀식의 최적 매개변수를 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석에 사용된 유역특성인자는 유역면적, 토지이용현황, 불투수면 비율, 유로연장이 사용되었다. 유역특성인자는 국토지리정보원의 1/25,000 수치표고모델 (Digital Elevation Model, DEM) 자료와 환경부 (2007)의 중분류 토지피복지도를 재분류하여 구축한 자료를 이용하였다. 불투수면 비율은 김학관 (2009)이 제시한 방법에 따라, 시가지 및 시설재배지를 불투수 지역으로 분류하고, 시가지의 불투수율을 60%, 시설재배지의 불투수율을 90%로 적용하여 불투수면적 및 불투수면적 비율을 산정하였다. 다중회귀분석은 단계입력방식을 이용하여 분석하였다. 상관성이 큰 독립변수가 먼저 선택되어 회귀식의 독립변수로 포함되었으며, 반복과정에서 상관성이 떨어지는 변수 및 공선성이 발생하는 변수는 제외되었다.

Table 5.4는 다중회귀분석에 사용된 유역특성인자와 회귀식의 최적 매개변수 사이의 Pearson 상관분석 결과를, Table 5.5는 다중회귀분석에 의해 개발된 매개변수 추정 회귀식과 상관계수 및 결정계수를 나타내고 있다. 개발된 회귀식은 매개변수에 따라 다른 유역특성에 대해 상관성을 나타내었으나, 공통적으로 불투수면과 관련하여 높은 상관성을 보였으며, 2가지 또는 3가지의 유역특성을 반영하여 회귀식이 완성되었다. 개발된 회귀식의 결정계수는 0.256 ~ 0.725의 범위로, 상관계수는 0.506 ~ 0.852의 범위로 나타났다. 다소 낮은 상관성을 갖는 회귀식이 있었으나, 김선주 등 (2000)은 TANK 모형의 매개변수를 유역특성에 따라 다중회귀분석하여 0.42 ~ 0.99의 상관계수를 갖는다고 보고한바 있으며, 안지현 (2013)은 유역경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정 회귀식을 개발함에 있어서 0.40 ~ 0.79의 상관계수를 갖는다고 보고한

바 있어, 본 연구에서 개발된 회귀식이 선행연구결과의 범위에 있으므로 타당성이 있다고 사료된다.

Table 5.4 Correlation between the watershed characteristics and T-N model coefficients

|                           |                |                |               |
|---------------------------|----------------|----------------|---------------|
| <b>Model coefficients</b> | <b>log(FL)</b> | <b>log(Im)</b> | <b>log(A)</b> |
| a <sub>0</sub>            | 0.758          | 0.254          | 0.758         |
| <b>Model coefficients</b> | <b>log(Im)</b> | <b>log(P)</b>  |               |
| a <sub>1</sub>            | -0.706         | -0.074         |               |
| <b>Model coefficients</b> | <b>log(P)</b>  | <b>log(Im)</b> |               |
| a <sub>2</sub>            | -0.092         | 0.528          |               |
| <b>Model coefficients</b> | <b>Im</b>      | <b>log(U)</b>  |               |
| a <sub>3</sub>            | -0.473         | -0.290         |               |

Table 5.5 T-N Model coefficients regression considering watershed characteristics

| <b>Model coefficient s</b> | <b>Regression equation</b>                              | <b>R</b> | <b>R<sup>2</sup></b> |
|----------------------------|---|----------|----------------------|
| a <sub>0</sub>             | $3.480 + 0.0031\log(FL) + 1.618\log(Im) + 1.309\log(A)$ | 0.850    | 0.722                |
| a <sub>1</sub>             | $0.983 - 0.348\log(Im) + 0.094\log(P)$                  | 0.753    | 0.567                |
| a <sub>2</sub>             | $0.018 - 0.037\log(P) + 0.084\log(Im)$                  | 0.638    | 0.407                |
| a <sub>3</sub>             | $0.033 - 0.004 \times Im - 0.034\log(U)$                | 0.511    | 0.261                |

Table 5.6은 개발된 회귀식으로 산정한 매개변수와 이를 이용하여 모의한 부하량 결과를 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의결과 R<sup>2</sup>는 0.64 ~ 0.98, NSE는 -0.34 ~ 0.97, RSR은 0.19 ~ 1.16, PBIAS는 -67.64 ~ 132.65의 범위로 나타났다. 대부분의 유역에서 모의결과는 실측치의 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났으며 (Moriasi et al., 2007), 일부유역에서 통계적 변량이 낮게 나타났으나, LOADEST의 선행연구범위에 속하는 것으로 나타났으며, 일 단위의 모의가 진행되었기 때문에 Moriasi et al. (2007)에 의해 제안된 통계적 변량에 비해 낮은

값을 나타내더라도 회귀식이 적절하게 매개변수를 산정할 수 있다고 사  
료된다.

Table 5.6 LOADEST Model T-N coefficients by MLR of the study watersheds

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |       |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE   | RSR  | PBIAS  |
| 갑천A       | 8.8717             | 0.7403         | 0.0633         | -0.0315        | 0.64           | 0.26  | 0.86 | -49.57 |
| 금분A       | 7.2047             | 1.0012         | -0.0023        | -0.0105        | 0.95           | 0.94  | 0.23 | 2.45   |
| 금분B       | 7.8141             | 1.0236         | -0.0067        | -0.0067        | 0.98           | 0.94  | 0.24 | 28.29  |
| 금분C       | 8.1385             | 1.0271         | -0.0059        | -0.0049        | 0.92           | 0.87  | 0.36 | -8.03  |
| 금분D       | 8.4125             | 1.0100         | -0.0025        | -0.0068        | 0.92           | 0.69  | 0.56 | -34.18 |
| 금분E       | 8.7594             | 1.0106         | -0.0025        | -0.0052        | 0.92           | 0.74  | 0.51 | -29.75 |
| 금분G       | 9.8138             | 0.9260         | 0.0174         | -0.0096        | 0.67           | 0.63  | 0.60 | -22.32 |
| 금분H       | 10.1656            | 0.9096         | 0.0196         | -0.0141        | 0.77           | 0.39  | 0.78 | -54.24 |
| 금분J       | 10.3904            | 0.9179         | 0.0173         | -0.0131        | 0.76           | 0.67  | 0.58 | -27.00 |
| 금분L       | 10.7337            | 0.9225         | 0.0149         | -0.0135        | 0.83           | 0.79  | 0.46 | -15.97 |
| 논산A       | 7.9713             | 0.9464         | 0.0064         | -0.0137        | 0.93           | 0.65  | 0.60 | -36.05 |
| 미호B       | 8.9944             | 0.8741         | 0.0250         | -0.0244        | 0.90           | 0.53  | 0.68 | -52.35 |
| 미호C       | 9.0992             | 0.8741         | 0.0251         | -0.0242        | 0.84           | 0.54  | 0.68 | -47.34 |
| 병천A       | 7.5132             | 0.9235         | 0.0147         | -0.0152        | 0.78           | -0.34 | 1.16 | 132.65 |
| 유등A       | 5.1152             | 1.1614         | -0.0371        | 0.0050         | 0.74           | 0.36  | 0.80 | -57.42 |
| 초강A       | 7.4462             | 1.0547         | -0.0137        | -0.0026        | 0.93           | 0.83  | 0.41 | 51.27  |
| 갑천A       | 8.1934             | 0.9416         | 0.0117         | -0.0097        | 0.97           | 0.27  | 0.85 | 71.07  |
| 금천A       | 5.6410             | 0.9523         | 0.0009         | -0.0184        | 0.87           | 0.53  | 0.69 | -47.74 |
| 금호A       | 8.0671             | 0.9628         | 0.0095         | -0.0040        | 0.90           | 0.87  | 0.36 | 10.44  |
| 금호B       | 8.6872             | 0.8994         | 0.0243         | -0.0088        | 0.85           | 0.68  | 0.57 | 23.21  |
| 금호C       | 9.3482             | 0.8195         | 0.0441         | -0.0151        | 0.94           | 0.84  | 0.40 | -35.96 |
| 길안A       | 6.8007             | 1.0414         | -0.0024        | 0.0008         | 0.95           | 0.13  | 0.93 | 85.95  |
| 낙분A       | 7.2070             | 0.6591         | 0.1248         | -0.0004        | 0.92           | 0.81  | 0.44 | 49.40  |
| 낙분C       | 9.0707             | 1.0104         | 0.0017         | -0.0044        | 0.79           | 0.76  | 0.49 | -19.59 |
| 낙분D       | 9.8503             | 1.0005         | -0.0006        | -0.0058        | 0.97           | 0.88  | 0.35 | -19.89 |
| 낙분E       | 10.2215            | 0.9828         | 0.0032         | -0.0067        | 0.97           | 0.96  | 0.19 | 2.66   |
| 낙분G       | 10.9283            | 0.9213         | 0.0180         | -0.0098        | 0.96           | -0.20 | 1.10 | 79.15  |

Table 5.6 LOADEST Model T-N coefficients by MLR of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 낙본H       | 11.1236            | 0.9224         | 0.0175         | -0.0095        | 0.96           | 0.87 | 0.36 | 22.34  |
| 낙본I       | 11.3602            | 0.9112         | 0.0199         | -0.0108        | 0.98           | 0.93 | 0.26 | 15.61  |
| 낙본J       | 11.4570            | 0.9065         | 0.0210         | -0.0112        | 0.95           | 0.70 | 0.55 | 29.80  |
| 남강A       | 7.8501             | 1.0308         | -0.0096        | 0.0008         | 0.88           | 0.85 | 0.39 | -0.06  |
| 남강B       | 8.2971             | 1.0228         | -0.0081        | 0.0015         | 0.97           | 0.76 | 0.49 | -18.83 |
| 남강D       | 8.5896             | 0.8318         | 0.0372         | -0.0207        | 0.92           | 0.86 | 0.38 | -17.67 |
| 남강E       | 9.0353             | 0.8304         | 0.0372         | -0.0234        | 0.92           | 0.91 | 0.30 | 2.36   |
| 내성A       | 8.0972             | 0.9683         | 0.0060         | -0.0089        | 0.97           | 0.92 | 0.28 | -14.87 |
| 밀양B       | 8.5852             | 0.9200         | 0.0196         | -0.0022        | 0.97           | 0.76 | 0.49 | 56.16  |
| 황강A       | 6.7507             | 0.8978         | 0.0171         | -0.0117        | 0.88           | 0.48 | 0.72 | -57.52 |
| 황강B       | 8.3653             | 0.9884         | 0.0003         | -0.0025        | 0.92           | 0.75 | 0.50 | 44.95  |
| 회천A       | 7.5466             | 0.9885         | 0.0006         | -0.0052        | 0.94           | 0.94 | 0.25 | 18.95  |
| 섬본C       | 8.3922             | 1.0017         | -0.0031        | -0.0070        | 0.96           | 0.96 | 0.20 | -3.91  |
| 영본B       | 9.3109             | 0.8207         | 0.0390         | -0.0250        | 0.91           | 0.89 | 0.34 | -3.04  |
| 영본C       | 9.4521             | 0.8322         | 0.0356         | -0.0265        | 0.82           | 0.56 | 0.66 | -31.52 |
| 영본D       | 9.4966             | 0.8397         | 0.0335         | -0.0265        | 0.83           | 0.51 | 0.70 | -34.89 |
| 오수A       | 7.4981             | 1.0000         | -0.0057        | -0.0078        | 0.98           | 0.38 | 0.79 | -67.18 |
| 요천A       | 6.4683             | 1.0454         | -0.0072        | 0.0109         | 0.97           | 0.81 | 0.44 | -39.90 |
| 경안A       | 8.0839             | 0.7495         | 0.0611         | -0.0321        | 0.90           | 0.43 | 0.76 | 51.85  |
| 경안B       | 8.5216             | 0.7618         | 0.0583         | -0.0287        | 0.95           | 0.94 | 0.25 | 23.61  |
| 골지A       | 7.3651             | 1.0517         | 0.0005         | -0.0020        | 0.97           | 0.79 | 0.46 | -38.66 |
| 공릉A       | 7.6148             | 0.8413         | 0.0341         | -0.0124        | 0.92           | 0.85 | 0.39 | -19.95 |
| 달천A       | 7.8939             | 1.0306         | -0.0064        | -0.0067        | 0.92           | 0.82 | 0.42 | -13.92 |
| 달천B       | 8.5683             | 0.9839         | 0.0035         | -0.0103        | 0.94           | 0.86 | 0.38 | -14.85 |
| 북하A       | 8.1116             | 0.8495         | 0.0292         | -0.0294        | 0.89           | 0.80 | 0.44 | 23.31  |
| 북한A       | 7.7411             | 0.9902         | 0.0041         | 0.0222         | 0.94           | 0.84 | 0.40 | -14.09 |
| 북한B       | 8.1875             | 0.9895         | 0.0059         | 0.0136         | 0.94           | 0.80 | 0.44 | -24.29 |

Table 5.6 LOADEST Model T-N coefficients by MLR of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 북한C       | 8.9746             | 1.0009         | 0.0055         | 0.0107         | 0.97           | 0.76 | 0.49 | -36.86 |
| 북한D       | 9.2737             | 1.0153         | 0.0009         | 0.0087         | 0.96           | 0.50 | 0.70 | -59.11 |
| 섬강A       | 7.6442             | 1.0248         | -0.0061        | 0.0002         | 0.97           | 0.97 | 0.19 | 7.08   |
| 섬강B       | 8.4757             | 0.9600         | 0.0091         | -0.0035        | 0.94           | 0.91 | 0.31 | -16.64 |
| 소양A       | 6.9481             | 1.1755         | -0.0324        | 0.0137         | 0.93           | 0.47 | 0.73 | -57.96 |
| 신천A       | 7.8340             | 0.9034         | 0.0193         | -0.0118        | 0.91           | 0.60 | 0.64 | -61.39 |
| 양화A       | 7.6262             | 0.8913         | 0.0183         | -0.0332        | 0.93           | 0.62 | 0.62 | 74.01  |
| 영평A       | 8.1568             | 0.8861         | 0.0252         | -0.0126        | 0.93           | 0.87 | 0.36 | -23.41 |
| 오대A       | 6.8170             | 1.0724         | -0.0065        | 0.0049         | 0.94           | 0.62 | 0.62 | -52.81 |
| 옥동A       | 6.5410             | 1.0977         | -0.0075        | 0.0095         | 0.95           | 0.90 | 0.32 | 12.75  |
| 왕숙A       | 8.0065             | 0.8004         | 0.0499         | -0.0262        | 0.93           | 0.52 | 0.69 | -53.64 |
| 인북A       | 7.2516             | 1.0619         | -0.0081        | 0.0171         | 0.88           | 0.81 | 0.44 | -23.76 |
| 제천A       | 7.7492             | 0.9400         | 0.0135         | -0.0045        | 0.97           | 0.93 | 0.26 | -4.34  |
| 조종A       | 6.9213             | 0.9981         | 0.0067         | -0.0016        | 0.96           | 0.96 | 0.21 | 5.03   |
| 주천A       | 7.1977             | 1.0947         | -0.0198        | -0.0004        | 0.94           | 0.85 | 0.39 | -30.87 |
| 중탕A       | 7.9362             | 0.7171         | 0.0680         | -0.0337        | 0.95           | 0.89 | 0.33 | -14.17 |
| 탄천A       | 8.2094             | 0.6122         | 0.0987         | -0.0745        | 0.97           | 0.40 | 0.77 | -55.91 |
| 평창A       | 8.0758             | 1.0584         | -0.0089        | -0.0028        | 0.93           | 0.65 | 0.59 | -50.45 |
| 한강B       | 9.0411             | 1.0313         | 0.0015         | -0.0019        | 0.93           | 0.68 | 0.57 | -47.59 |
| 한강C       | 9.4008             | 1.0248         | 0.0015         | -0.0022        | 0.95           | 0.33 | 0.82 | -67.64 |
| 한강E       | 10.3867            | 0.9841         | 0.0048         | -0.0071        | 0.97           | 0.79 | 0.46 | -34.96 |
| 한강F       | 10.8308            | 0.9762         | 0.0077         | -0.0035        | 0.96           | 0.56 | 0.66 | -53.71 |
| 한강G       | 10.9331            | 0.9667         | 0.0100         | -0.0042        | 0.94           | 0.60 | 0.63 | -49.06 |
| 한강H       | 11.2638            | 0.9138         | 0.0228         | -0.0071        | 0.90           | 0.60 | 0.63 | -49.91 |
| 한강I       | 11.4641            | 0.8843         | 0.0300         | -0.0092        | 0.90           | 0.47 | 0.73 | -56.51 |
| 홍천A       | 8.0914             | 1.0534         | -0.0110        | 0.0049         | 0.96           | 0.87 | 0.36 | -26.33 |
| 흑천A       | 7.4641             | 0.9474         | 0.0121         | -0.0052        | 0.94           | 0.49 | 0.72 | 90.60  |

## 5.2.2 T-P 회귀식 매개변수 추정

T-P 회귀식 매개변수 추정을 위한 회귀식은 T-N과 같은 방식으로 실시하였으며, Table 5.7은 유역특성인자와 T-P 회귀식 최적매개변수 사이의 Pearson 상관분석 결과를, Table 5.8은 개발된 매개변수 추정 회귀식과 상관계수 및 결정계수를 나타내고 있다.

T-N과 마찬가지로 매개변수에 따라 다른 유역특성에 대해 상관성을 나타내었으며, 불투수면에 대해 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. T-P 매개변수 추정 회귀식은 3개의 유역특성을 고려하여 개발되었으며, 결정계수는 0.507 ~ 0.766의 범위로 T-N 보다는 다소 높은 범위를 갖는 것으로 나타나 개발된 회귀식의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

Table 5.7 Correlation between the watershed characteristics and T-P model coefficients

| Model coefficients | FL                   | log(I <sub>m</sub> ) | log(A)         |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| a <sub>0</sub>     | 0.688                | 0.473                | 0.654          |
| Model coefficients | log(I <sub>m</sub> ) | U                    | log(P)         |
| a <sub>1</sub>     | -0.613               | 0.093                | -0.067         |
| Model coefficients | log(I <sub>m</sub> ) | log(A)               | I <sub>m</sub> |
| a <sub>2</sub>     | -0.681               | -0.102               | -0.675         |

Table 5.8 T-P Model coefficients regression considering watershed characteristics

| Model coefficient s | Regression equation                                | R     | R <sup>2</sup> |
|---------------------|--|-------|----------------|
| a <sub>0</sub>      | $-0.973 + 0.004FL + 3.113\log(I_m) + 1.344\log(A)$ | 0.875 | 0.766          |
| a <sub>1</sub>      | $1.045 - 0.517\log(I_m) + 0.022U + 0.092\log(P)$   | 0.712 | 0.507          |
| a <sub>2</sub>      | $0.071 - 0.069\log(I_m) - 0.029\log(A) - 0.011I_m$ | 0.750 | 0.562          |

Table 5.9는 개발된 회귀식으로 산정한 매개변수와 이를 이용하여 모의한 부하량을 편의보정한 결과의 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의 결과 R<sup>2</sup>는 0.47 ~ 0.96, NSE는 -0.47 ~ 0.93, RSR은 0.26 ~ 1.21,

PBIAS는 -81.46 ~ 134.74의 범위로 나타났다. T-N에 비해 일부 유역에서 통계적 변량이 선행 연구에서 벗어나는 것으로 나타났는데 고수위 자료가 많이 있는 유역에서 통계적 변량이 낮게 나타났다. 그러나 고수위 자료를 제외하고 모의결과는 실측치의 경향성과 크기를 잘 모의하는 것으로 나타나 매개변수 추정에 회귀식의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

Table 5.9 LOADEST Model T-P coefficients by MLR of the study watersheds

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 갑천A       | 5.9936             | 0.7963         | -0.1737        | 0.55           | 0.48 | 0.72 | -17.37 |
| 금본A       | 3.2424             | 1.2786         | -0.0371        | 0.93           | 0.93 | 0.27 | -1.97  |
| 금본B       | 3.7708             | 1.2737         | -0.0424        | 0.84           | 0.28 | 0.85 | 66.95  |
| 금본C       | 4.0788             | 1.2665         | -0.0446        | 0.80           | 0.58 | 0.65 | -19.70 |
| 금본D       | 4.4699             | 1.2542         | -0.0536        | 0.84           | 0.43 | 0.75 | -52.89 |
| 금본E       | 4.8535             | 1.2334         | -0.0585        | 0.85           | 0.47 | 0.73 | -52.26 |
| 금본G       | 6.4058             | 1.1019         | -0.0958        | 0.48           | 0.25 | 0.86 | 0.31   |
| 금본H       | 6.8940             | 1.1023         | -0.1118        | 0.77           | 0.66 | 0.58 | -29.25 |
| 금본J       | 7.1454             | 1.1070         | -0.1113        | 0.68           | 0.65 | 0.59 | -10.72 |
| 금본L       | 7.5847             | 1.1094         | -0.1153        | 0.70           | 0.68 | 0.57 | 25.15  |
| 논산A       | 4.4062             | 1.1469         | -0.0749        | 0.88           | 0.77 | 0.48 | -42.30 |
| 미호B       | 5.7397             | 1.1161         | -0.1209        | 0.79           | 0.48 | 0.72 | -58.35 |
| 미호C       | 5.8535             | 1.1141         | -0.1224        | 0.73           | 0.47 | 0.73 | -55.77 |
| 병천A       | 3.9292             | 1.1398         | -0.0682        | 0.86           | 0.85 | 0.39 | 30.25  |
| 유등A       | 0.3029             | 1.3977         | 0.0395         | 0.73           | 0.26 | 0.86 | -69.68 |
| 초강A       | 3.2552             | 1.2816         | -0.0276        | 0.96           | 0.90 | 0.31 | 32.09  |
| 감천A       | 4.5415             | 1.1214         | -0.0729        | 0.94           | 0.88 | 0.34 | 5.01   |
| 금천A       | 2.0492             | 1.1924         | -0.0337        | 0.52           | 0.38 | 0.79 | -51.84 |
| 금호A       | 4.2455             | 1.1252         | -0.0591        | 0.70           | 0.68 | 0.56 | -18.60 |
| 금호B       | 5.1774             | 1.0323         | -0.0905        | 0.51           | 0.50 | 0.71 | -0.51  |
| 금호C       | 6.2083             | 0.8939         | -0.1333        | 0.66           | 0.43 | 0.75 | -43.30 |
| 길안A       | 2.4007             | 1.2636         | -0.0081        | 0.86           | 0.85 | 0.39 | 65.72  |
| 낙본A       | 3.4493             | 0.7679         | -0.0495        | 0.67           | 0.60 | 0.63 | 65.49  |
| 낙본C       | 5.1180             | 1.2498         | -0.0560        | 0.88           | 0.81 | 0.43 | -16.05 |
| 낙본D       | 6.1389             | 1.2166         | -0.0778        | 0.79           | 0.75 | 0.50 | -8.43  |
| 낙본E       | 6.6672             | 1.1882         | -0.0864        | 0.81           | 0.81 | 0.44 | 14.84  |
| 낙본G       | 7.7302             | 1.0864         | -0.1128        | 0.77           | 0.07 | 0.96 | 107.09 |

Table 5.9 LOADEST Model T-P coefficients by MLR of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |       |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|-------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE   | RSR  | PBIAS  |
| 낙본H       | 7.9614             | 1.0837         | -0.1149        | 0.76           | 0.53  | 0.68 | 45.27  |
| 낙본I       | 8.2965             | 1.0694         | -0.1216        | 0.71           | 0.29  | 0.84 | 59.67  |
| 낙본J       | 8.4366             | 1.0611         | -0.1243        | 0.68           | -0.47 | 1.21 | 91.26  |
| 남강A       | 3.8077             | 1.1931         | -0.0437        | 0.55           | 0.35  | 0.80 | -48.02 |
| 남강B       | 4.3426             | 1.1704         | -0.0535        | 0.92           | 0.33  | 0.82 | -65.58 |
| 남강D       | 5.4386             | 0.9377         | -0.1265        | 0.77           | 0.71  | 0.54 | -9.52  |
| 남강E       | 5.9429             | 0.9627         | -0.1359        | 0.77           | 0.76  | 0.48 | 20.56  |
| 내성A       | 4.3156             | 1.1797         | -0.0619        | 0.76           | 0.65  | 0.60 | -29.89 |
| 밀양B       | 4.9899             | 1.0196         | -0.0807        | 0.86           | 0.64  | 0.60 | 64.90  |
| 황강A       | 3.3408             | 0.9825         | -0.0713        | 0.59           | 0.21  | 0.89 | -73.30 |
| 황강B       | 4.5719             | 1.1416         | -0.0613        | 0.94           | 0.85  | 0.38 | 30.37  |
| 회천A       | 3.6556             | 1.1722         | -0.0475        | 0.72           | 0.68  | 0.56 | -17.70 |
| 섬본C       | 4.5576             | 1.2188         | -0.0585        | 0.50           | 0.29  | 0.84 | 38.89  |
| 영본B       | 6.2510             | 0.9391         | -0.1512        | 0.68           | 0.66  | 0.59 | -21.34 |
| 영본C       | 6.3890             | 0.9931         | -0.1487        | 0.80           | 0.50  | 0.71 | 62.72  |
| 영본D       | 6.4163             | 1.0174         | -0.1463        | 0.67           | 0.25  | 0.87 | 60.17  |
| 오수A       | 3.6593             | 1.2032         | -0.0486        | 0.73           | 0.63  | 0.61 | 8.65   |
| 요천A       | 2.1381             | 1.1779         | -0.0052        | 0.48           | 0.29  | 0.84 | 134.74 |
| 경안A       | 5.1172             | 0.8421         | -0.1515        | 0.73           | -0.15 | 1.07 | 102.17 |
| 경안B       | 5.5227             | 0.8531         | -0.1514        | 0.81           | 0.22  | 0.88 | 95.64  |
| 골지A       | 2.8380             | 1.3403         | -0.0103        | 0.89           | 0.42  | 0.76 | -62.18 |
| 공릉A       | 4.3863             | 0.8786         | -0.1050        | 0.78           | 0.61  | 0.63 | -22.87 |
| 달천A       | 3.8147             | 1.3016         | -0.0370        | 0.88           | 0.78  | 0.47 | -21.67 |
| 달천B       | 4.7950             | 1.2493         | -0.0595        | 0.89           | 0.86  | 0.37 | -12.66 |
| 북하A       | 4.9511             | 1.0697         | -0.1213        | 0.84           | 0.70  | 0.55 | 0.21   |
| 북한A       | 3.7674             | 1.0448         | -0.0435        | 0.55           | 0.31  | 0.83 | -30.70 |
| 북한B       | 4.2103             | 1.0741         | -0.0494        | 0.76           | 0.51  | 0.70 | -16.59 |

Table 5.9 LOADEST Model T-P coefficients by MLR of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 북한C       | 4.9883             | 1.1151         | -0.0557        | 0.80           | 0.36 | 0.80 | -41.04 |
| 북한D       | 5.3007             | 1.1443         | -0.0586        | 0.85           | 0.18 | 0.90 | -67.50 |
| 섬강A       | 3.5725             | 1.1990         | -0.0372        | 0.78           | 0.70 | 0.55 | -11.22 |
| 섬강B       | 4.7385             | 1.1072         | -0.0683        | 0.66           | 0.56 | 0.66 | -35.97 |
| 소양A       | 1.9756             | 1.3921         | 0.0124         | 0.62           | 0.25 | 0.87 | -71.41 |
| 신천A       | 4.3554             | 1.0354         | -0.0822        | 0.51           | 0.12 | 0.94 | -81.46 |
| 양화A       | 4.2935             | 1.3750         | -0.0931        | 0.93           | 0.93 | 0.26 | 11.42  |
| 영평A       | 4.7194             | 1.0172         | -0.0912        | 0.75           | 0.56 | 0.66 | -26.13 |
| 오대A       | 2.2188             | 1.2927         | 0.0010         | 0.47           | 0.11 | 0.94 | -79.99 |
| 옥동A       | 1.6819             | 1.3188         | 0.0143         | 0.57           | 0.54 | 0.68 | -16.13 |
| 왕숙A       | 4.8070             | 0.9917         | -0.1144        | 0.93           | 0.31 | 0.83 | -73.43 |
| 인북A       | 2.8156             | 1.1907         | -0.0145        | 0.57           | 0.24 | 0.87 | -59.37 |
| 제천A       | 4.0351             | 1.0724         | -0.0620        | 0.76           | 0.58 | 0.64 | -12.26 |
| 조종A       | 2.7443             | 1.2051         | -0.0198        | 0.58           | 0.56 | 0.66 | -18.63 |
| 주천A       | 2.7590             | 1.3465         | -0.0100        | 0.77           | 0.59 | 0.64 | -39.70 |
| 중랑A       | 5.1154             | 0.7132         | -0.1788        | 0.89           | 0.64 | 0.60 | -25.92 |
| 탄천A       | 5.6966             | 0.7759         | -0.2608        | 0.89           | 0.42 | 0.76 | -53.18 |
| 평창A       | 3.8010             | 1.3238         | -0.0292        | 0.80           | 0.61 | 0.62 | -40.58 |
| 한강B       | 4.8940             | 1.2843         | -0.0441        | 0.87           | 0.67 | 0.58 | -30.09 |
| 한강C       | 5.3884             | 1.2682         | -0.0509        | 0.59           | 0.38 | 0.79 | -56.40 |
| 한강E       | 6.8347             | 1.2114         | -0.0826        | 0.71           | 0.44 | 0.75 | -37.22 |
| 한강F       | 7.3361             | 1.1567         | -0.0899        | 0.86           | 0.55 | 0.67 | -42.67 |
| 한강G       | 7.4954             | 1.1448         | -0.0934        | 0.91           | 0.69 | 0.55 | -30.89 |
| 한강H       | 8.0736             | 1.0649         | -0.1127        | 0.77           | 0.66 | 0.58 | -40.68 |
| 한강I       | 8.4174             | 1.0200         | -0.1250        | 0.78           | 0.56 | 0.66 | -51.05 |
| 홍천A       | 3.9215             | 1.2207         | -0.0346        | 0.85           | 0.70 | 0.55 | -6.14  |
| 흑천A       | 3.7001             | 1.0979         | -0.0532        | 0.55           | 0.43 | 0.75 | 115.90 |

## 5.3 인공신경망을 이용한 회귀식 매개변수 추정

### 5.3.1 T-N 회귀식 매개변수 추정

인공신경망을 이용하여 회귀식의 매개변수를 추정하기 위해, MATLAB 프로그램의 Neural net fitting 앱을 이용하였다. 인공신경망의 학습에 필요한 입력자료는 다중회귀분석에 사용한 유역특성인자 (유역면적, 유로연장, 토지이용현황, 불투수면적 비율)를 이용하였으며, 출력자료는 LOADEST 모형에 의해 산정된 최적 매개변수를 이용하였다.

인공신경망은 정확한 모형구축을 위해서는 학습에 사용되는 자료의 기간이 길어야 하며, 모형에 따라 최적의 은닉층 노드수가 있어서 학습시 최적의 노드수를 결정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 학습에 사용되는 자료수가 적어 은닉층의 개수를 50개로 가정하여 모의를 실시하였으며, 오차가 0.001이하일 때 모형을 최적 모형으로 선택하였다.

Table 5.10은 학습된 ANN 모형을 이용하여 모의한 매개변수와 부하량 모의결과의 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의결과  $R^2$ 는 0.62 ~ 0.98, NSE는 0.12 ~ 0.97, RSR은 0.18 ~ 0.94, PBIAS는 -78.37 ~ 79.75의 범위로 나타났다. 대부분의 유역에서 모의결과는 실측치의 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 일부 유역에서 Moriasi et al. (2007)이 제안한 월단위 기준에서 벗어나는 것으로 나타났으나, 기존 LOADEST 연구 범위에 속하여 개발된 신경망 모형이 매개변수를 적절하게 모의한다고 사료된다.

Table 5.10 LOADEST Model T-N coefficients by ANN of the study watersheds

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 감천A       | 8.6915             | 0.6790         | 0.0323         | -0.0609        | 0.62           | 0.12 | 0.94 | -58.06 |
| 금본A       | 7.6130             | 0.9592         | -0.0047        | -0.0307        | 0.95           | 0.92 | 0.28 | 42.28  |
| 금본B       | 7.5826             | 1.0884         | -0.0252        | 0.0023         | 0.97           | 0.92 | 0.28 | -0.39  |
| 금본C       | 7.9167             | 1.0621         | -0.0205        | -0.0056        | 0.92           | 0.78 | 0.47 | -27.05 |
| 금본D       | 8.5583             | 1.0641         | -0.0176        | -0.0030        | 0.91           | 0.77 | 0.48 | -25.32 |
| 금본E       | 9.0281             | 1.0590         | -0.0283        | -0.0099        | 0.92           | 0.85 | 0.39 | -13.52 |
| 금본G       | 10.0338            | 0.9649         | 0.0172         | -0.0668        | 0.66           | 0.41 | 0.77 | -1.38  |
| 금본H       | 10.7141            | 0.8439         | 0.0222         | -0.0595        | 0.79           | 0.78 | 0.47 | 6.99   |
| 금본J       | 10.4432            | 0.8312         | 0.0257         | -0.0686        | 0.77           | 0.67 | 0.57 | -24.82 |
| 금본L       | 10.9049            | 0.9048         | 0.0056         | -0.0931        | 0.85           | 0.85 | 0.39 | -0.89  |
| 논산A       | 8.6284             | 0.9339         | 0.0313         | -0.0654        | 0.98           | 0.95 | 0.22 | 27.71  |
| 미호B       | 9.0651             | 0.8511         | 0.0387         | -0.0308        | 0.90           | 0.58 | 0.64 | -48.39 |
| 미호C       | 9.4141             | 0.8319         | 0.0470         | -0.0356        | 0.83           | 0.72 | 0.53 | -28.06 |
| 병천A       | 7.2530             | 0.9308         | 0.0035         | -0.0286        | 0.79           | 0.54 | 0.68 | 75.71  |
| 유등A       | 5.7794             | 1.1269         | 0.0066         | -0.0096        | 0.83           | 0.76 | 0.49 | -7.88  |
| 초강A       | 6.8880             | 1.1074         | -0.0209        | -0.0021        | 0.93           | 0.90 | 0.31 | -7.66  |
| 감천A       | 8.1233             | 0.9465         | -0.0221        | 0.0115         | 0.98           | 0.96 | 0.20 | 37.88  |
| 금천A       | 6.5714             | 0.9772         | 0.0217         | 0.0209         | 0.91           | 0.86 | 0.37 | 47.63  |
| 금호A       | 7.0926             | 1.0654         | -0.0152        | 0.0296         | 0.95           | 0.61 | 0.63 | -57.33 |
| 금호B       | 8.7537             | 1.0145         | -0.0155        | 0.0645         | 0.98           | 0.94 | 0.25 | 26.28  |
| 금호C       | 9.9106             | 0.8637         | 0.0205         | 0.0208         | 0.97           | 0.95 | 0.23 | 6.60   |
| 길안A       | 4.9083             | 1.0952         | -0.0123        | 0.0069         | 0.96           | 0.49 | 0.71 | -68.32 |
| 낙본A       | 6.9998             | 0.8388         | 0.0760         | 0.0163         | 0.93           | 0.88 | 0.34 | 20.51  |
| 낙본C       | 9.1753             | 1.0082         | 0.0028         | 0.0012         | 0.80           | 0.79 | 0.46 | -11.77 |
| 낙본D       | 9.9488             | 1.0185         | 0.0083         | 0.0136         | 0.97           | 0.95 | 0.23 | -8.70  |
| 낙본E       | 9.2392             | 0.9795         | 0.0082         | 0.0143         | 0.96           | 0.49 | 0.71 | -59.53 |
| 낙본G       | 10.3215            | 0.8935         | -0.0019        | -0.0097        | 0.96           | 0.90 | 0.32 | -14.44 |

Table 5.10 LOADEST Model T-N coefficients by ANN of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 낙본H       | 10.9849            | 0.9051         | 0.0105         | 0.0067         | 0.97           | 0.97 | 0.18 | 2.66   |
| 낙본I       | 11.1176            | 0.8992         | 0.0215         | -0.0004        | 0.98           | 0.96 | 0.20 | -10.93 |
| 낙본J       | 10.9397            | 0.9179         | 0.0184         | -0.0078        | 0.97           | 0.92 | 0.29 | -23.10 |
| 남강A       | 7.3779             | 1.0739         | -0.0071        | 0.0097         | 0.90           | 0.76 | 0.49 | -31.63 |
| 남강B       | 8.4299             | 1.0685         | -0.0251        | 0.0157         | 0.95           | 0.77 | 0.47 | -9.71  |
| 남강D       | 8.4238             | 0.7159         | 0.0649         | -0.0064        | 0.93           | 0.71 | 0.54 | -31.53 |
| 남강E       | 8.7654             | 0.7886         | 0.0740         | -0.0145        | 0.92           | 0.87 | 0.36 | -15.38 |
| 내성A       | 8.2651             | 0.9829         | -0.0046        | 0.0245         | 0.98           | 0.97 | 0.18 | -1.31  |
| 밀양B       | 8.1460             | 1.0411         | 0.0078         | -0.0007        | 0.97           | 0.90 | 0.31 | 18.79  |
| 황강A       | 7.7390             | 0.9957         | 0.0159         | 0.0272         | 0.96           | 0.92 | 0.28 | 30.76  |
| 황강B       | 7.7316             | 1.0545         | -0.0451        | 0.0020         | 0.90           | 0.73 | 0.52 | -17.52 |
| 회천A       | 6.9900             | 1.0148         | -0.0139        | 0.0080         | 0.94           | 0.73 | 0.52 | -33.19 |
| 섬본C       | 8.0071             | 1.1057         | -0.0361        | 0.0078         | 0.96           | 0.82 | 0.43 | -30.32 |
| 영본B       | 9.6336             | 0.7495         | -0.0551        | -0.0249        | 0.74           | 0.65 | 0.59 | 17.81  |
| 영본C       | 9.5077             | 0.8566         | -0.0205        | -0.0471        | 0.78           | 0.53 | 0.69 | -29.91 |
| 영본D       | 9.7866             | 0.8653         | -0.0175        | -0.0523        | 0.81           | 0.71 | 0.53 | -15.62 |
| 오수A       | 6.9199             | 1.0535         | 0.0161         | -0.0223        | 0.97           | 0.25 | 0.87 | -78.37 |
| 요천A       | 5.7488             | 1.0540         | 0.0112         | 0.0083         | 0.95           | 0.55 | 0.67 | -66.97 |
| 경안A       | 8.0434             | 0.6629         | 0.0176         | -0.0698        | 0.87           | 0.81 | 0.44 | 33.94  |
| 경안B       | 9.0510             | 0.6021         | 0.0302         | -0.0322        | 0.90           | 0.70 | 0.55 | 79.75  |
| 골지A       | 7.6478             | 1.0208         | 0.0019         | 0.0146         | 0.97           | 0.89 | 0.33 | -22.86 |
| 공릉A       | 8.2408             | 0.7658         | 0.0812         | -0.0326        | 0.91           | 0.49 | 0.71 | 53.42  |
| 달천A       | 8.2728             | 1.0744         | 0.0029         | -0.0014        | 0.95           | 0.89 | 0.34 | 35.28  |
| 달천B       | 8.6114             | 1.0615         | 0.0646         | 0.0084         | 0.92           | 0.59 | 0.64 | 24.99  |
| 북하A       | 8.2358             | 0.9119         | -0.0002        | -0.0131        | 0.89           | 0.66 | 0.58 | 34.65  |
| 북한A       | 7.9045             | 1.0632         | 0.0044         | 0.0177         | 0.94           | 0.94 | 0.24 | 6.61   |
| 북한B       | 8.5365             | 0.9931         | 0.0011         | 0.0261         | 0.93           | 0.93 | 0.27 | 3.38   |

Table 5.10 LOADEST Model T-N coefficients by ANN of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 북한C       | 9.6534             | 0.9878         | 0.0016         | 0.0123         | 0.96           | 0.94 | 0.25 | 16.89  |
| 북한D       | 10.1938            | 1.0308         | -0.0035        | -0.0087        | 0.96           | 0.95 | 0.23 | -2.76  |
| 섬강A       | 7.3970             | 1.0261         | -0.0011        | -0.0036        | 0.97           | 0.92 | 0.28 | -14.36 |
| 섬강B       | 8.7815             | 0.9582         | -0.0090        | -0.0072        | 0.95           | 0.95 | 0.23 | 6.45   |
| 소양A       | 8.1850             | 0.9810         | -0.0081        | 0.0278         | 0.93           | 0.91 | 0.29 | 19.48  |
| 신천A       | 8.1965             | 0.7789         | 0.0382         | -0.0042        | 0.91           | 0.72 | 0.53 | -44.89 |
| 양화A       | 7.3082             | 0.8789         | 0.0191         | -0.0029        | 0.92           | 0.90 | 0.31 | 27.12  |
| 영평A       | 8.1291             | 0.7931         | 0.0025         | 0.0126         | 0.93           | 0.65 | 0.59 | -35.75 |
| 오대A       | 7.1223             | 1.0015         | 0.0092         | 0.0050         | 0.95           | 0.76 | 0.49 | -38.24 |
| 옥동A       | 7.1131             | 0.9874         | 0.0010         | 0.0117         | 0.95           | 0.44 | 0.75 | 71.81  |
| 왕숙A       | 8.9113             | 0.7327         | 0.1170         | -0.0334        | 0.89           | 0.62 | 0.62 | 18.58  |
| 인북A       | 7.7204             | 0.9579         | -0.0120        | 0.0338         | 0.87           | 0.86 | 0.38 | 10.79  |
| 제천A       | 7.3620             | 0.9028         | -0.0004        | -0.0079        | 0.94           | 0.65 | 0.59 | -36.14 |
| 조종A       | 5.9551             | 1.0209         | -0.0048        | 0.0045         | 0.94           | 0.50 | 0.71 | -59.84 |
| 주천A       | 7.6390             | 1.0562         | -0.0107        | -0.0096        | 0.94           | 0.93 | 0.26 | 3.36   |
| 중탕A       | 8.3139             | 0.6517         | 0.0914         | -0.0967        | 0.96           | 0.83 | 0.41 | 32.80  |
| 탄천A       | 9.0991             | 0.2915         | 0.2093         | -0.0773        | 0.97           | 0.95 | 0.23 | 19.35  |
| 평창A       | 9.0285             | 1.0093         | 0.0038         | -0.0029        | 0.91           | 0.80 | 0.44 | 20.47  |
| 한강B       | 9.9389             | 1.0417         | -0.0057        | 0.0005         | 0.95           | 0.87 | 0.36 | 21.67  |
| 한강C       | 10.3860            | 1.0457         | -0.0373        | -0.0028        | 0.96           | 0.86 | 0.37 | -23.42 |
| 한강E       | 10.7873            | 1.0030         | -0.0137        | 0.0046         | 0.97           | 0.95 | 0.22 | -5.89  |
| 한강F       | 11.5488            | 1.0286         | 0.0088         | 0.0017         | 0.95           | 0.95 | 0.23 | -3.01  |
| 한강G       | 11.4916            | 0.9810         | 0.0189         | -0.0009        | 0.96           | 0.94 | 0.25 | -9.95  |
| 한강H       | 11.8360            | 0.7819         | 0.0619         | -0.0170        | 0.95           | 0.93 | 0.26 | -10.31 |
| 한강I       | 12.2222            | 0.6489         | 0.0966         | -0.0308        | 0.94           | 0.94 | 0.25 | -2.35  |
| 홍천A       | 9.1056             | 1.0065         | -0.0155        | 0.0105         | 0.96           | 0.37 | 0.79 | 79.44  |
| 흑천A       | 7.0591             | 0.9333         | -0.0069        | -0.0023        | 0.92           | 0.90 | 0.31 | 19.36  |

### 5.3.2 T-P 회귀식 매개변수 추정

T-P 회귀매개변수 추정모형 또한 T-N과 같은 방법으로 구축하였으며, 은닉층 개수 또한 50개로 가정하였다. Table 5.11은 학습된 ANN 모형을 이용하여 모의한 매개변수와 편의보정한 부하량 모의결과의 통계적 변량을 나타내고 있다.

모의결과  $R^2$ 는 0.45 ~ 0.95, NSE는 -0.25 ~ 0.91, RSR은 0.30 ~ 1.12, PBIAS는 -79.53 ~ 126.32의 범위로 나타났다. 대부분의 유역에서 모의결과는 실측치의 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났지만, 다중회귀분석을 이용한 모의결과에서 낮은 통계적 변량을 갖는 것으로 나타났던 유역에서의 동일하게 통계적 변량이 낮게 나타났다. 이들 유역을 제외하면 모의 결과의 통계적 변량이 만족스러운 범위에 속하여 개발된 모형이 매개변수를 적절하게 모의한다고 사료된다.

**Table 5.11 LOADEST Model T-P coefficients by ANN of the study watersheds**

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 갑천A       | 6.0876             | 0.7921         | -0.2254        | 0.47           | 0.40 | 0.77 | -4.14  |
| 금본A       | 2.8663             | 1.4378         | -0.0240        | 0.92           | 0.91 | 0.29 | 1.55   |
| 금본B       | 3.2607             | 1.3847         | -0.0302        | 0.82           | 0.80 | 0.45 | 0.69   |
| 금본C       | 3.6814             | 1.3357         | -0.0462        | 0.81           | 0.39 | 0.78 | -42.97 |
| 금본D       | 4.4131             | 1.3434         | -0.0567        | 0.85           | 0.40 | 0.77 | -49.95 |
| 금본E       | 4.7774             | 1.3102         | -0.0511        | 0.86           | 0.40 | 0.77 | -51.44 |
| 금본G       | 6.3746             | 0.8938         | -0.0976        | 0.54           | 0.45 | 0.74 | -13.46 |
| 금본H       | 7.1104             | 1.0147         | -0.1993        | 0.72           | 0.63 | 0.61 | -8.99  |
| 금본J       | 7.2166             | 0.9956         | -0.1677        | 0.67           | 0.54 | 0.68 | -7.24  |
| 금본L       | 7.3939             | 1.1559         | -0.1230        | 0.69           | 0.66 | 0.58 | 8.17   |
| 논산A       | 5.1542             | 1.2053         | -0.0913        | 0.88           | 0.79 | 0.45 | 32.60  |
| 미호B       | 6.0399             | 1.0900         | -0.1472        | 0.75           | 0.46 | 0.73 | -44.77 |
| 미호C       | 6.4376             | 1.0917         | -0.1619        | 0.69           | 0.57 | 0.65 | -20.88 |
| 병천A       | 2.9826             | 1.1808         | -0.0490        | 0.88           | 0.45 | 0.74 | -45.90 |
| 유등A       | 0.9789             | 1.2550         | -0.0007        | 0.73           | 0.23 | 0.88 | -55.43 |
| 초강A       | 2.2331             | 1.3294         | -0.0245        | 0.95           | 0.60 | 0.63 | -45.97 |
| 감천A       | 4.3249             | 1.1155         | -0.0679        | 0.94           | 0.64 | 0.60 | -16.40 |
| 금천A       | 2.7623             | 1.2381         | 0.0050         | 0.56           | 0.53 | 0.69 | 5.89   |
| 금호A       | 3.1677             | 1.1300         | -0.0430        | 0.73           | 0.25 | 0.87 | -73.08 |
| 금호B       | 4.6083             | 1.0647         | -0.0641        | 0.59           | 0.41 | 0.77 | -40.21 |
| 금호C       | 6.2673             | 0.7492         | -0.1605        | 0.49           | 0.21 | 0.89 | -42.60 |
| 길안A       | 1.2498             | 1.2242         | -0.0067        | 0.85           | 0.32 | 0.82 | -53.88 |
| 낙본A       | 3.0237             | 0.8509         | -0.0741        | 0.68           | 0.54 | 0.67 | 10.20  |
| 낙본C       | 4.8555             | 1.2781         | -0.0342        | 0.89           | 0.57 | 0.65 | -34.16 |
| 낙본D       | 6.0346             | 1.2901         | -0.0476        | 0.83           | 0.68 | 0.57 | -10.97 |
| 낙본E       | 5.9396             | 1.2495         | -0.0414        | 0.86           | 0.51 | 0.70 | -40.69 |
| 낙본G       | 6.3118             | 0.9448         | -0.0835        | 0.77           | 0.23 | 0.88 | -60.70 |

Table 5.11 LOADEST Model T-P coefficientss by ANN of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 낙본H       | 7.4790             | 1.1058         | -0.1059        | 0.78           | 0.70 | 0.54 | -8.84  |
| 낙본I       | 7.8554             | 1.0934         | -0.1216        | 0.71           | 0.69 | 0.55 | 5.95   |
| 낙본J       | 7.6964             | 1.0688         | -0.1231        | 0.68           | 0.64 | 0.60 | -7.93  |
| 남강A       | 3.3240             | 1.1437         | -0.0380        | 0.56           | 0.15 | 0.92 | -70.70 |
| 남강B       | 3.8040             | 1.1792         | -0.0353        | 0.93           | 0.15 | 0.92 | -79.53 |
| 남강D       | 5.2568             | 0.9614         | -0.1074        | 0.81           | 0.52 | 0.69 | -23.22 |
| 남강E       | 5.7874             | 0.9718         | -0.1210        | 0.80           | 0.69 | 0.56 | 3.88   |
| 내성A       | 4.3186             | 1.2730         | -0.0416        | 0.78           | 0.63 | 0.60 | -19.09 |
| 밀양B       | 3.9212             | 0.9364         | -0.0780        | 0.86           | 0.39 | 0.78 | -51.49 |
| 황강A       | 3.9804             | 0.9024         | -0.0827        | 0.56           | 0.21 | 0.89 | -55.72 |
| 황강B       | 3.2912             | 1.1718         | -0.0393        | 0.94           | 0.21 | 0.89 | -62.19 |
| 회천A       | 3.0382             | 1.1316         | -0.0486        | 0.71           | 0.32 | 0.82 | -60.08 |
| 섬본C       | 3.9096             | 1.3447         | -0.0310        | 0.44           | 0.43 | 0.75 | -12.67 |
| 영본B       | 6.3217             | 1.0109         | -0.1563        | 0.69           | 0.63 | 0.61 | -10.85 |
| 영본C       | 6.0055             | 1.0849         | -0.1797        | 0.78           | 0.75 | 0.50 | 35.60  |
| 영본D       | 6.1128             | 1.0920         | -0.1922        | 0.61           | 0.43 | 0.75 | 48.39  |
| 오수A       | 3.4000             | 1.2760         | -0.0632        | 0.74           | 0.51 | 0.70 | -7.13  |
| 요천A       | 1.8494             | 1.1364         | -0.0065        | 0.48           | 0.45 | 0.74 | 64.11  |
| 경안A       | 4.5044             | 0.9011         | -0.1789        | 0.72           | 0.70 | 0.55 | 18.64  |
| 경안B       | 5.6472             | 0.7743         | -0.1988        | 0.72           | 0.49 | 0.72 | 126.32 |
| 골지A       | 2.6816             | 1.2970         | -0.0214        | 0.90           | 0.23 | 0.87 | -69.67 |
| 공릉A       | 4.4537             | 0.9504         | -0.0967        | 0.80           | 0.58 | 0.65 | -14.83 |
| 달천A       | 3.5008             | 1.3567         | -0.0454        | 0.88           | 0.58 | 0.65 | -36.00 |
| 달천B       | 4.8936             | 1.2494         | -0.0497        | 0.90           | 0.79 | 0.46 | -3.75  |
| 북하A       | 5.3393             | 1.1225         | -0.1187        | 0.85           | 0.79 | 0.46 | 51.40  |
| 북한A       | 3.3735             | 1.0535         | -0.0263        | 0.55           | 0.14 | 0.92 | -52.47 |
| 북한B       | 4.2304             | 1.1336         | -0.0170        | 0.78           | 0.47 | 0.73 | -10.27 |

Table 5.11 LOADEST Model T-P coefficientss by ANN of the study watersheds (continued)

| Watershed | Model coefficients |                |                | Statistics     |      |      |        |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------|--------|
|           | a <sub>0</sub>     | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | R <sup>2</sup> | NSE  | RSR  | PBIAS  |
| 북한C       | 5.3378             | 1.2537         | -0.0648        | 0.85           | 0.54 | 0.68 | -3.98  |
| 북한D       | 5.0084             | 1.3103         | -0.0847        | 0.90           | 0.17 | 0.91 | -70.51 |
| 섬강A       | 2.9918             | 1.1943         | -0.0438        | 0.78           | 0.35 | 0.81 | -51.06 |
| 섬강B       | 4.6115             | 1.0903         | -0.0748        | 0.65           | 0.37 | 0.79 | -44.05 |
| 소양A       | 3.3573             | 1.3089         | 0.0012         | 0.61           | 0.55 | 0.67 | 3.69   |
| 신천A       | 4.5034             | 1.0145         | -0.0766        | 0.51           | 0.09 | 0.95 | -78.92 |
| 양화A       | 3.9245             | 1.4787         | -0.0257        | 0.92           | 0.80 | 0.44 | -11.88 |
| 영평A       | 4.8759             | 0.9026         | -0.0965        | 0.73           | 0.37 | 0.79 | -24.64 |
| 오대A       | 2.5557             | 1.1917         | 0.0088         | 0.46           | 0.08 | 0.96 | -75.46 |
| 옥동A       | 2.5335             | 1.1952         | 0.0153         | 0.57           | 0.56 | 0.66 | 52.53  |
| 왕숙A       | 6.1008             | 0.9806         | -0.1351        | 0.92           | 0.81 | 0.44 | -6.59  |
| 인북A       | 3.1773             | 1.2105         | 0.0008         | 0.56           | 0.25 | 0.86 | -40.37 |
| 제천A       | 3.7829             | 0.9253         | -0.0998        | 0.68           | 0.25 | 0.87 | -37.49 |
| 조종A       | 1.9629             | 1.1462         | -0.0335        | 0.60           | 0.21 | 0.89 | -68.68 |
| 주천A       | 2.5852             | 1.3061         | -0.0132        | 0.78           | 0.36 | 0.80 | -53.07 |
| 중랑A       | 5.2887             | 0.8223         | -0.2749        | 0.89           | 0.84 | 0.40 | 0.31   |
| 탄천A       | 6.5282             | 0.7139         | -0.1772        | 0.87           | 0.51 | 0.70 | -4.05  |
| 평창A       | 4.0866             | 1.3639         | -0.0184        | 0.79           | 0.65 | 0.59 | -14.72 |
| 한강B       | 5.0231             | 1.5174         | -0.0181        | 0.87           | 0.87 | 0.37 | 15.22  |
| 한강C       | 5.7884             | 1.4689         | -0.0213        | 0.54           | 0.49 | 0.71 | -26.02 |
| 한강E       | 6.8760             | 1.3151         | -0.0331        | 0.75           | 0.45 | 0.74 | -29.47 |
| 한강F       | 7.4464             | 1.3296         | -0.0417        | 0.90           | 0.61 | 0.62 | -27.44 |
| 한강G       | 7.7573             | 1.2409         | -0.0468        | 0.92           | 0.74 | 0.51 | -5.89  |
| 한강H       | 8.7834             | 0.8448         | -0.0575        | 0.72           | 0.63 | 0.61 | 3.84   |
| 한강I       | 9.4035             | 0.5834         | -0.0663        | 0.68           | 0.56 | 0.66 | 14.42  |
| 홍천A       | 3.9996             | 1.2985         | 0.0072         | 0.91           | 0.77 | 0.47 | 17.39  |
| 흑천A       | 3.2598             | 0.9825         | -0.0862        | 0.52           | 0.37 | 0.79 | 17.77  |

## 제 6 장 미계측 유역 적용성 평가

개발된 오염부하량 추정 회귀식의 적용성 평가를 위해 4개의 대표유역을 선정하고, 다중회귀식과 인공신경망을 이용하여 매개변수를 추정하고 모의하였다. 모의된 결과를 실측치와 LOADEST 기반 모의결과와 비교하였다. 대상유역은 가평A, 한강A, 내성B, 보청A를 선정하였으며, Table 6.1은 대상유역의 특성과 토지이용현황을 나타내고 있다.

**Table 6.1 Characteristics and land use for evaluating watersheds**

| Watershed | Area (km <sup>2</sup> ) | Flow length (km) | Paddy (%) | Upland (%) | Forest (%) | Impervious area (%) |
|-----------|-------------------------|------------------|-----------|------------|------------|---------------------|
| 가평A       | 304.4                   | 41.16            | 2.5       | 3.0        | 89.9       | 1.0                 |
| 한강A       | 4805.9                  | 199.22           | 2.1       | 8.4        | 85.3       | 0.8                 |
| 내성B       | 1516.4                  | 106.56           | 14.8      | 11.0       | 61.7       | 2.2                 |
| 보청A       | 406.1                   | 39.85            | 17.0      | 9.7        | 66.1       | 1.7                 |

### 6.1 다중회귀분석을 이용한 회귀식 매개변수 검정

가. T-N 부하량 모의

Table 6.2는 다중회귀분석을 통해 개발된 회귀식을 이용하여 산정한 매개변수와 LOADEST 모형을 이용하여 추정한 매개변수를 나타내고 있으며, Table 6.3은 부하량 모의치에 대한 방법별 통계적 변량을 나타내고 있다. 한편, Fig. 6.1은 실측치와 모의치 간의 산포도를 나타내고 있다.

모의결과 LOADEST의 통계적 변량은  $R^2$  0.92 ~ 0.97, NSE 0.83 ~ 0.97, RSR 0.18 ~ 0.42, PBIAS 9.20 ~ 19.59로 나타났으며, 다중회귀분석 결과로부터의 통계적 변량은  $R^2$  0.93 ~ 0.97, NSE 0.59 ~ 0.95, RSR 0.22 ~ 0.64, PBIAS -56.85 ~ 88.71로 나타났다. 통계적 변량을 통해 LOADEST 모형을 이용하여 추정한 회귀매개변수가 실측치에 더

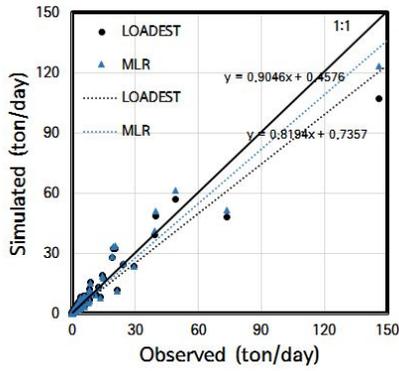
가까운 모의를 하는 것으로 나타났으나, 두 가지 방법 모두 Moriasi et al. (2007)이 제안한 범위에 통계적 변량이 속하여, 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

**Table 6.2 T-N Model coefficientss by LOADEST and MLR**

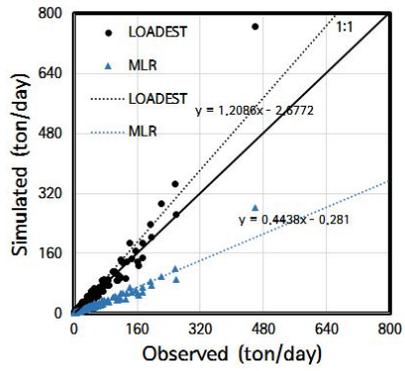
| Watershed |                | 가평A     | 한강A     | 내성B     | 보청A     |
|-----------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| LOADEST   | a <sub>0</sub> | 6.9603  | 9.7135  | 8.8744  | 6.7831  |
|           | a <sub>1</sub> | 0.9999  | 1.0077  | 0.9637  | 1.0605  |
|           | a <sub>2</sub> | -0.0042 | 0.0202  | 0.0076  | 0.0052  |
|           | a <sub>3</sub> | 0.0082  | -0.0040 | 0.0062  | -0.0310 |
| MLR       | a <sub>0</sub> | 6.8268  | 8.7530  | 8.5225  | 7.3856  |
|           | a <sub>1</sub> | 1.0267  | 1.0437  | 0.9728  | 1.0188  |
|           | a <sub>2</sub> | 0.0017  | -0.0012 | 0.0037  | -0.0082 |
|           | a <sub>3</sub> | 0.0127  | -0.0016 | -0.0113 | -0.0073 |

**Table 6.3 T-N Statistics of the LOADEST and MLR performance**

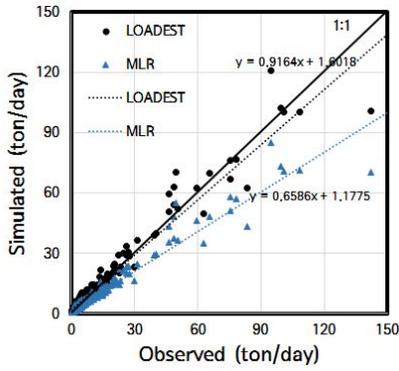
|         |                | 가평A   | 한강A    | 내성B    | 보청A   |
|---------|----------------|-------|--------|--------|-------|
| LOADEST | R <sup>2</sup> | 0.92  | 0.93   | 0.97   | 0.97  |
|         | NSE            | 0.92  | 0.83   | 0.97   | 0.96  |
|         | RSR            | 0.28  | 0.42   | 0.18   | 0.20  |
|         | PBIAS          | 12.65 | 9.20   | 9.55   | 19.59 |
| MLR     | R <sup>2</sup> | 0.94  | 0.93   | 0.97   | 0.94  |
|         | NSE            | 0.95  | 0.59   | 0.86   | 0.71  |
|         | RSR            | 0.22  | 0.64   | 0.37   | 0.54  |
|         | PBIAS          | 9.57  | -56.85 | -20.98 | 88.71 |



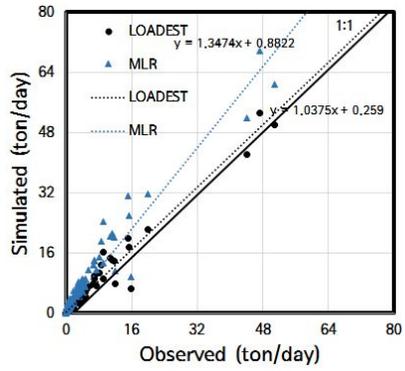
(a) 가평A



(b) 한강A



(c) 내성B



(d) 보청A

Fig. 6.1 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the simulated by MLR

나. T-P 부하량 모의

Table 6.4는 다중회귀분석을 통해 개발된 지역화식을 이용하여 산정한 회귀매개변수와 LOADEST 모형을 이용하여 추정한 회귀매개변수를 나타내고 있으며, Table 6.5는 부하량 모의치에 대한 방법별 통계적 변량을 나타내고 있다. 한편, Fig. 6.2는 실측치와 모의치 간의 산포도를 나타내고 있다.

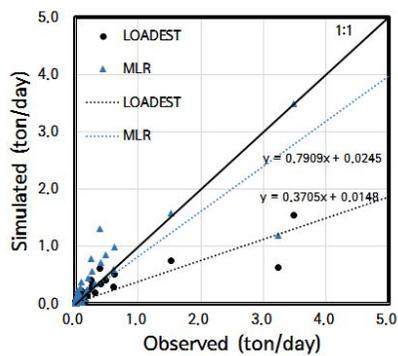
모의결과 LOADEST의 통계적 변량은  $R^2$  0.69 ~ 0.93, NSE 0.55 ~ 0.89, RSR 0.33 ~ 0.67, PBIAS -27.36 ~ 27.67로 나타났으며, 다중회귀분석 결과로부터의 통계적 변량은  $R^2$  0.64 ~ 0.93, NSE 0.54 ~ 0.87, RSR 0.36 ~ 0.68, PBIAS -51.06 ~ 38.00으로 나타나, LOADEST 모형을 이용하여 추정한 회귀매개변수가 실측치에 더 가까운 모의를 하는 것으로 나타났다. T-N에 비해 모의의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났으나, 두 가지 방법 모두 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

**Table 6.4 T-P Model coefficientss by LOADEST and MLR**

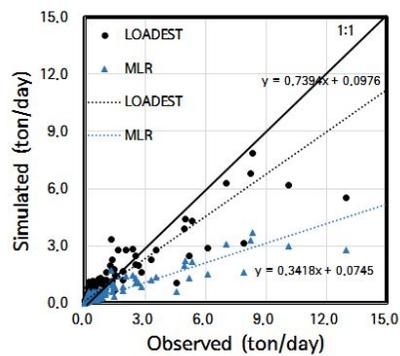
| Watershed |                | 가평A     | 한강A     | 내성B     | 보청A     |
|-----------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| LOADEST   | a <sub>0</sub> | 2.0674  | 5.0249  | 5.2748  | 2.6868  |
|           | a <sub>1</sub> | 1.0619  | 1.3828  | 1.3503  | 1.4693  |
|           | a <sub>2</sub> | 0.0162  | -0.0353 | -0.0246 | -0.0655 |
| MLR       | a <sub>0</sub> | 2.4764  | 4.4950  | 4.8039  | 3.4068  |
|           | a <sub>1</sub> | 1.1576  | 1.3045  | 1.2158  | 1.2530  |
|           | a <sub>2</sub> | -0.0104 | -0.0386 | -0.0695 | -0.0391 |

Table 6.5 T-P Statistics of the LOADEST and MLR performance

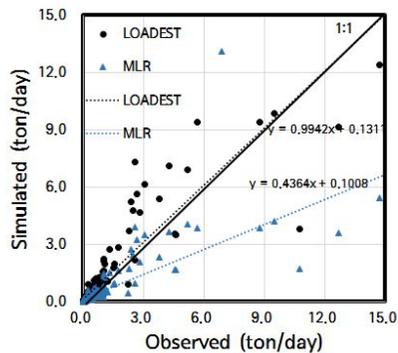
|         |                | 가평A    | 한강A    | 내성B    | 보청A    |
|---------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| LOADEST | R <sup>2</sup> | 0.77   | 0.93   | 0.69   | 0.90   |
|         | NSE            | 0.70   | 0.89   | 0.55   | 0.82   |
|         | RSR            | 0.54   | 0.33   | 0.67   | 0.42   |
|         | PBIAS          | -27.36 | -6.74  | 27.67  | -14.46 |
| MLR     | R <sup>2</sup> | 0.76   | 0.93   | 0.64   | 0.88   |
|         | NSE            | 0.87   | 0.54   | 0.56   | 0.78   |
|         | RSR            | 0.36   | 0.68   | 0.66   | 0.47   |
|         | PBIAS          | 38.00  | -51.06 | -34.64 | 4.54   |



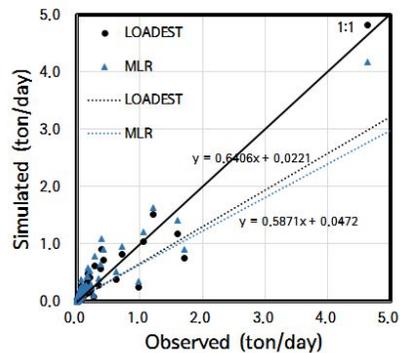
(a) 가평A



(b) 한강A



(c) 내성B



(d) 보청A

Fig. 6.2 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the simulated by MLR

## 6.2 인공신경망을 이용한 회귀식 매개변수 검증

가. T-N 부하량 모의

Table 6.6은 인공신경망 모형에 의해 산정된 매개변수와 LOADEST 모형을 이용하여 추정된 매개변수를 나타내고 있으며, Table 6.7은 부하량 모의치에 대한 회귀매개변수 산정방법별 통계적 변량을 나타내고 있다. 한편, Fig. 6.3은 실측치와 모의치 간의 산포도를 나타내고 있다.

모의결과 LOADEST의 통계적 변량은  $R^2$  0.92 ~ 0.97, NSE 0.83 ~ 0.97, RSR 0.18 ~ 0.42, PBIAS 9.20 ~ 19.59으로 나타났으며, 인공신경망 모형에 의한 결과로부터의 통계적 변량은  $R^2$  0.92 ~ 0.98, NSE 0.89 ~ 0.95, RSR 0.22 ~ 0.34, PBIAS -19.80 ~ 14.13으로 나타났다. LOADEST 모형을 이용하여 추정된 회귀매개변수가 실측치에 더 가까운 모의를 하는 것으로 나타났으나, 두 가지 방법 모두 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

**Table 6.6 Model coefficientss by LOADEST and ANN**

| Watershed |                | 가평A     | 한강A     | 내성B    | 보청A     |
|-----------|----------------|---------|---------|--------|---------|
| LOADEST   | a <sub>0</sub> | 6.9603  | 9.7135  | 8.8744 | 6.7831  |
|           | a <sub>1</sub> | 0.9999  | 1.0077  | 0.9637 | 1.0605  |
|           | a <sub>2</sub> | -0.0042 | 0.0202  | 0.0076 | 0.0052  |
|           | a <sub>3</sub> | 0.0082  | -0.0040 | 0.0062 | -0.0310 |
| ANN       | a <sub>0</sub> | 6.9110  | 9.3848  | 8.6050 | 6.7396  |
|           | a <sub>1</sub> | 0.9645  | 1.0202  | 1.0164 | 1.1188  |
|           | a <sub>2</sub> | -0.0009 | 0.0176  | 0.0095 | -0.0144 |
|           | a <sub>3</sub> | 0.0178  | -0.0017 | 0.0063 | -0.0163 |

Table 6.7 T-N Statistics of the LOADEST and ANN performance

|         |                | 가평A   | 한강A    | 내성B   | 보청A   |
|---------|----------------|-------|--------|-------|-------|
| LOADEST | R <sup>2</sup> | 0.92  | 0.93   | 0.97  | 0.97  |
|         | NSE            | 0.92  | 0.83   | 0.97  | 0.96  |
|         | RSR            | 0.28  | 0.42   | 0.18  | 0.20  |
|         | PBIAS          | 12.65 | 9.20   | 9.55  | 19.59 |
| ANN     | R <sup>2</sup> | 0.92  | 0.92   | 0.98  | 0.95  |
|         | NSE            | 0.89  | 0.90   | 0.95  | 0.95  |
|         | RSR            | 0.34  | 0.31   | 0.22  | 0.22  |
|         | PBIAS          | 3.17  | -19.80 | -9.19 | 14.13 |

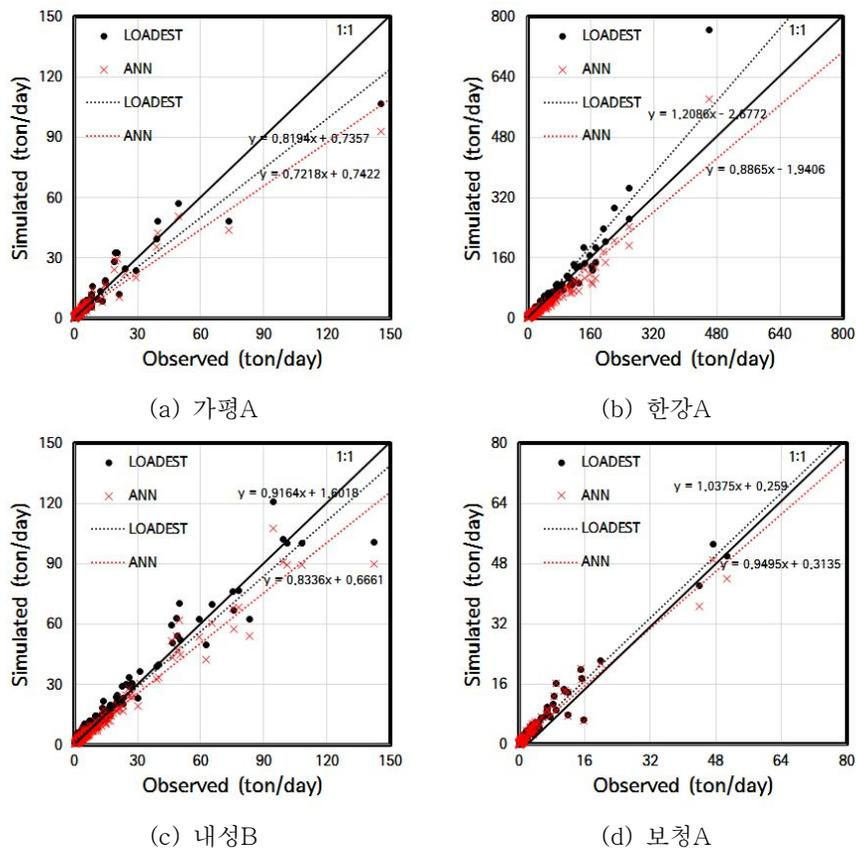


Fig. 6.3 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the simulated by ANN

나. T-P 부하량 모의

Table 6.8은 인공신경망 모형에 의해 산정된 매개변수와 LOADEST 모형을 이용하여 추정된 매개변수를 나타내고 있으며, Table 6.9는 부하량 모의치에 대한 회귀매개변수 산정방법별 통계적 변량을 나타내고 있다. 한편, Fig. 6.4는 실측치와 모의치 간의 산포도를 나타내고 있다.

모의결과 LOADEST의 통계적 변량은  $R^2$  0.69 ~ 0.93, NSE 0.55 ~ 0.89, RSR 0.33 ~ 0.67, PBIAS -27.36 ~ 27.67로 나타났으며, 인공신경망 모형에 의한 결과로부터의 통계적 변량은  $R^2$  0.65 ~ 0.91, NSE 0.35 ~ 0.82, RSR 0.42 ~ 0.81, PBIAS -53.48 ~ 51.79로 나타났다. 두 방법 모두 유사한 통계적 변량을 나타내었으며, 값의 범위는 모의치가 실측치의 경향성과 범위를 잘 반영하는 것으로 나타났다. T-N에 비해 다소 낮은 통계적 변량을 갖는 것으로 나타났으나 신뢰할 만한 수준의 모의 결과 범위에 속하는 것으로 나타났다.

**Table 6.8 Model coefficientss by LOADEST and ANN**

| Watershed |                | 가평A     | 한강A     | 내성B     | 보청A     |
|-----------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| LOADEST   | a <sub>0</sub> | 2.0674  | 5.0249  | 5.2748  | 2.6868  |
|           | a <sub>1</sub> | 1.0619  | 1.3828  | 1.3503  | 1.4693  |
|           | a <sub>2</sub> | 0.0162  | -0.0353 | -0.0246 | -0.0655 |
| ANN       | a <sub>0</sub> | 2.6116  | 4.4514  | 5.3480  | 2.3704  |
|           | a <sub>1</sub> | 1.1407  | 1.4975  | 1.3493  | 1.3555  |
|           | a <sub>2</sub> | -0.0004 | -0.0236 | -0.0495 | -0.0333 |

Table 6.9 T-P Statistics of the LOADEST and ANN performance

|         |                | 가평A    | 한강A    | 내성B   | 보청A    |
|---------|----------------|--------|--------|-------|--------|
| LOADEST | R <sup>2</sup> | 0.77   | 0.93   | 0.69  | 0.90   |
|         | NSE            | 0.70   | 0.89   | 0.55  | 0.82   |
|         | RSR            | 0.54   | 0.33   | 0.67  | 0.42   |
|         | PBIAS          | -27.36 | -6.74  | 27.67 | -14.46 |
| ANN     | R <sup>2</sup> | 0.77   | 0.91   | 0.65  | 0.89   |
|         | NSE            | 0.82   | 0.80   | 0.35  | 0.49   |
|         | RSR            | 0.42   | 0.45   | 0.81  | 0.72   |
|         | PBIAS          | 51.79  | -35.90 | 40.35 | -53.48 |

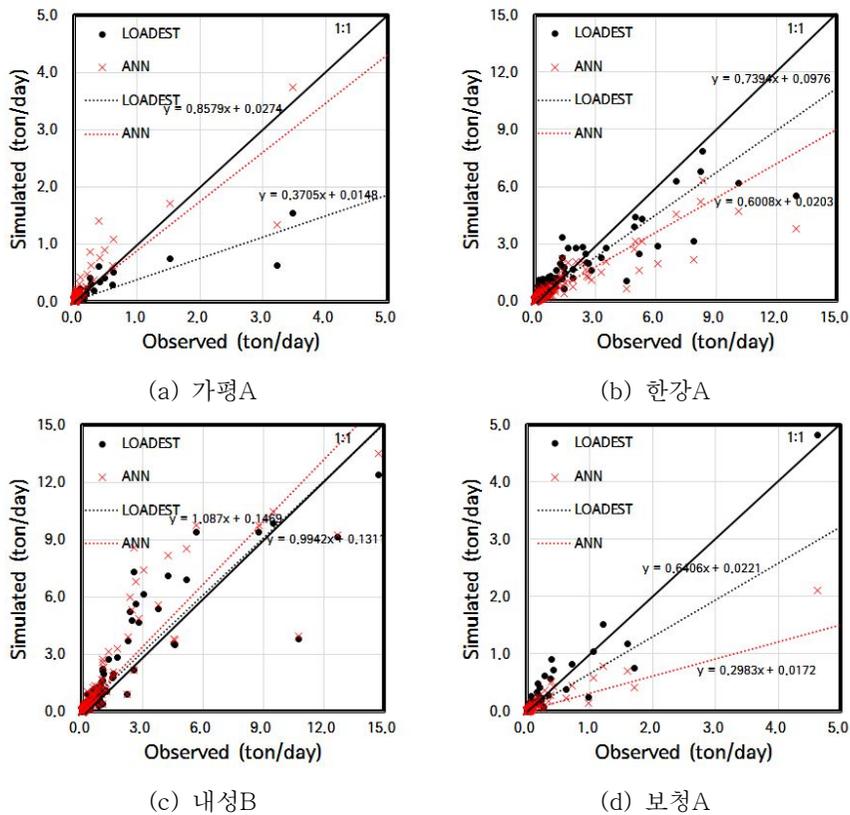


Fig. 6.4 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the simulated by ANN

### 6.3 회귀식의 비교 및 평가

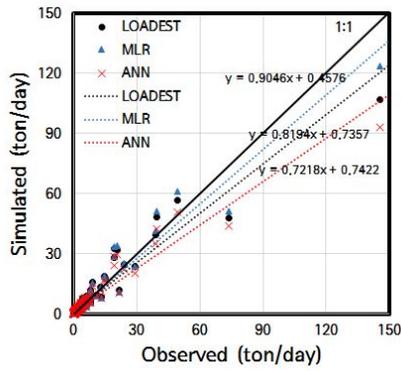
미계측 유역을 대상으로 실측치 및 실측치 기반 모형 매개변수로 구한 오염부하량과 다중회귀분석과 인공신경망으로 추정된 매개변수를 이용하여 계산한 오염부하량 결과를 비교하였다. Table 6.10은 방법별로 T-N과 T-P 부하량 산정결과의 통계적 변량을 나타낸 것이며, Fig. 6.5는 T-N의 산포도를, Fig. 6.6은 T-P의 산포도를 나타낸 것이다.

3가지 방법을 비교한 결과 실측치를 이용하여 회귀식의 매개변수를 산정하여 사용하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났으며, 인공신경망으로 추정된 매개변수가 다중 회귀식에 의해 추정된 값보다 실측치와 더 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 통계적 변량을 살펴봤을 때, 다중회귀분석이나 인공신경망에 의해 추정된 매개변수로 산정한 부하량 결과가 실측치를 반영하지 못하는 것은 아니며, 충분히 결과의 타당성이 있는 것으로 나타났다. 또한 유역마다 모의의 정확도가 높은 매개변수 추정방법이 다르게 나타났기 때문에 평균적으로 모의의 정확도가 높게 나타난 ANN을 반드시 사용하기 보다는 두 방법을 비교하여 복합적으로 사용하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

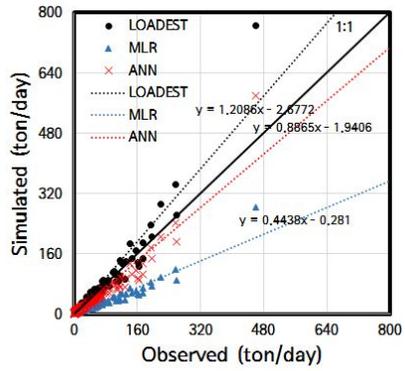
한편, 수질 모형을 이용하여 T-N과 T-P 부하량을 산정한 선행연구를 살펴보면 Shang et al. (2012)은 SWAT 모형을 이용하여 월단위로 T-N 부하량을 모의할 때, 검정기간에 대해  $R^2$  는 0.68 ~ 0.74, NSE는 0.67 ~ 0.70의 범위로 모의되었다고 보고한 바 있으며, Kang et al. (2006)은 SWAT 모형을 이용하여 일단위로 T-N과 T-P 부하량을 모의하여 보정기간에 대해 각각  $R^2$  0.84, 0.81, NSE 0.73, 0.42로 나타나며, 검정기간에 대해  $R^2$  0.85, 0.85, NSE 0.65, 0.19로 나타난다고 보고한 바 있다. 개발된 회귀식은 수질 모형에 비해 낮은 통계적 변량을 갖는 유역도 있었으나, 유사한 수준에서 모의가 가능한 것으로 나타나, 미계측 유역의 수질모의를 위한 하나의 방법으로 사용할 수 있을 것으로 사료되며, 정책결정을 위한 1등급 또는 2등급 수준의 스크린 모델로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 6.10 T-N and T-P Statistics of the LOADEST, MLR and ANN performance

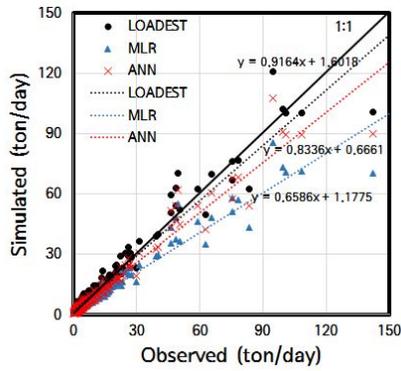
|     |         |                | 가평A    | 한강A    | 내성B    | 보청A    |
|-----|---------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| T-N | LOADEST | R <sup>2</sup> | 0.92   | 0.93   | 0.97   | 0.97   |
|     |         | NSE            | 0.92   | 0.83   | 0.97   | 0.96   |
|     |         | RSR            | 0.28   | 0.42   | 0.18   | 0.20   |
|     |         | PBIAS          | 12.65  | 9.20   | 9.55   | 19.59  |
|     | MLR     | R <sup>2</sup> | 0.94   | 0.93   | 0.97   | 0.94   |
|     |         | NSE            | 0.95   | 0.59   | 0.86   | 0.71   |
|     |         | RSR            | 0.22   | 0.64   | 0.37   | 0.54   |
|     |         | PBIAS          | 9.57   | -56.85 | -20.98 | 88.71  |
|     | ANN     | R <sup>2</sup> | 0.92   | 0.92   | 0.98   | 0.95   |
|     |         | NSE            | 0.89   | 0.90   | 0.95   | 0.95   |
|     |         | RSR            | 0.34   | 0.31   | 0.22   | 0.22   |
|     |         | PBIAS          | 3.17   | -19.80 | -9.19  | 14.13  |
| T-P | LOADEST | R <sup>2</sup> | 0.77   | 0.93   | 0.69   | 0.90   |
|     |         | NSE            | 0.70   | 0.89   | 0.55   | 0.82   |
|     |         | RSR            | 0.54   | 0.33   | 0.67   | 0.42   |
|     |         | PBIAS          | -27.36 | -6.74  | 27.67  | -14.46 |
|     | MLR     | R <sup>2</sup> | 0.76   | 0.93   | 0.64   | 0.88   |
|     |         | NSE            | 0.87   | 0.54   | 0.56   | 0.78   |
|     |         | RSR            | 0.36   | 0.68   | 0.66   | 0.47   |
|     |         | PBIAS          | 38.00  | -51.06 | -34.64 | 4.54   |
|     | ANN     | R <sup>2</sup> | 0.77   | 0.91   | 0.65   | 0.89   |
|     |         | NSE            | 0.82   | 0.80   | 0.35   | 0.49   |
|     |         | RSR            | 0.42   | 0.45   | 0.81   | 0.72   |
|     |         | PBIAS          | 51.79  | -35.90 | 40.35  | -53.48 |



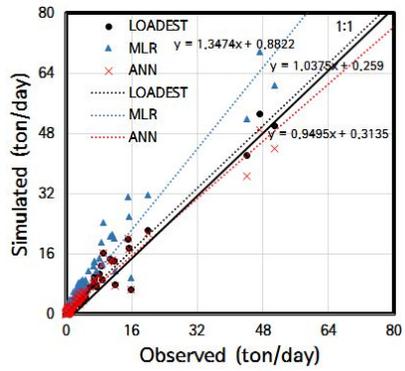
(a) 가평A



(b) 한강A

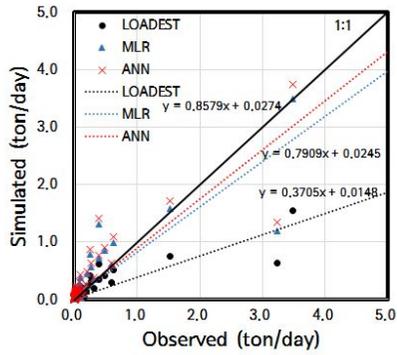


(c) 내성B

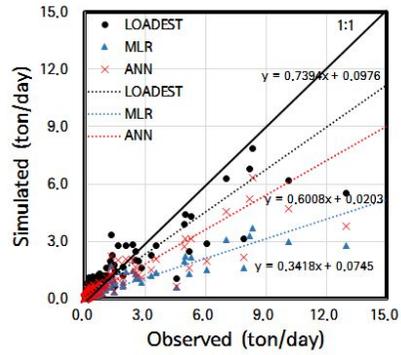


(d) 보청A

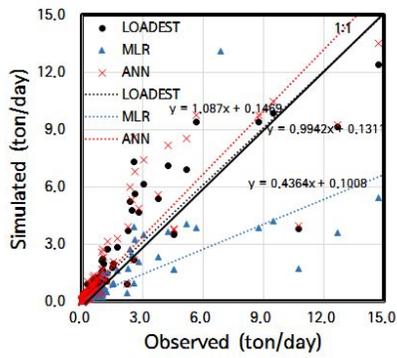
Fig. 6.5 Scatter plots of the observed T-N pollutant loads against the simulated



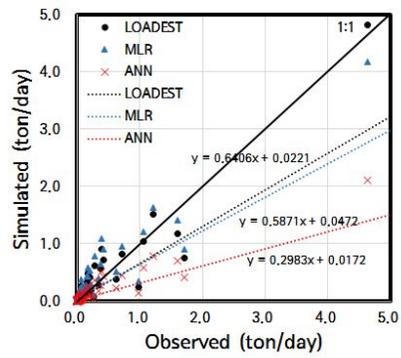
(a) 가평A



(b) 한강A



(c) 내성B



(d) 보청A

Fig. 6.6 Scatter plots of the observed T-P pollutant loads against the simulated

## 제 7 장 요약 및 결론

본 연구에서는 미계측 유역의 오염부하량 추정을 위해, 수질 및 유량 자료를 확보하고 있는 수질오염총량제 실시유역 81개를 대상으로 LOADEST 회귀모형의 유역별 최적 매개변수를 추정하고, 다중회귀분석 및 인공신경망을 이용하여 토지이용, 유역면적, 유로연장 등 유역특성인자에 따른 매개변수 추정방법을 개발하였다. 또한, 개발된 방법을 시범유역에 적용하여 적용성을 검토하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수질오염총량제 실시유역 중 81개 유역을 대상으로 유량자료와 수질자료를 구축하였으며, 유역특성자료의 수집을 위해 GIS 자료를 이용하여 유역별 면적, 유로연장, 토지이용현황, 불투수면적 비율을 구축하였다.

2. 오염부하량 모의를 위한 회귀모형을 선택하기 위해 매개변수와 유역특성간의 상관분석을 실시하였으며,  $\sin(\text{dtime})$ 과  $\cos(\text{dtime})$  항의 매개변수는 유역특성과 관계가 없는 것으로 나타났다. 이를 제외하고 실측치와 가장 유사하게 모의하는 것으로 나타난 모형으로, T-N은 LOADEST의 5번 회귀모형을, T-P는 3번 회귀모형을 선택하였다. 유역별로 선택된 회귀모형의 최적매개변수를 추정하였으며, 매개변수를 이용하여 오염부하량을 모의하였다. 모의결과 T-N 부하량의  $R^2$ 는 0.65 ~ 0.99, NSE는 0.01 ~ 0.99, RSR은 0.12 ~ 0.97, PBIAS는 -86.46 ~ 16.77의 범위로 나타났으며, T-P 부하량의  $R^2$  0.42 ~ 0.96로, NSE 0.22 ~ 0.91, RSR 0.30 ~ 0.88, PBIAS -65.05 ~ -2.13의 범위로 나타나 LOADEST 기반의 최적 매개변수가 실측치를 잘 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

3. 한편, 두 물질 모두 오염부하량이 과소 모의되어 실측치와 편이가 발생하는 것으로 나타나, 보정이 필요할 것으로 사료되었으며, 분위사상법을 이용하여 모의치를 편이보정 하였다. 보정결과, 두 물질 모두 보정 전에 비해 모의치와 실측치간의 상관계수가 1에 가깝게 나타나, 보정이 효과가 있는 것으로 사료되었다. 통계적 변량은 T-N의 경우  $R^2$  0.63 ~ 0.98, NSE 0.06 ~ 0.98, RSR 0.15 ~ 0.97, PBIAS -82.27 ~ 36.02로 나타났으며, T-P는  $R^2$  0.42 ~ 0.96, NSE -0.04 ~ 0.93, RSR 0.26 ~ 1.02, PBIAS -50.97 ~ 32.74로 나타났다.  $R^2$ , NSE, RSR은 편이보정 전에 비해 큰 변화가 나타나지 않았으나, PBIAS의 경우 모든 유역에서 증가하여, 편이보정에 의해 모의치가 과소모의 되는 경향이 다소 사라지는 것으로 나타났다.

4. 회귀모형 매개변수 추정방법의 개발을 위해, 다중회귀분석과 인공신경망 기법을 이용하였다. 유역특성과 최적매개변수간의 다중회귀분석을 실시하여 매개변수추정 회귀식을 개발하였으며, 개발된 회귀식을 통해 매개변수를 산정하여 오염부하량을 모의하였다. 모의결과, T-N 부하량 결과는  $R^2$ 는 0.64 ~ 0.98, NSE는 -0.34 ~ 0.97, RSR은 0.19 ~ 1.16, PBIAS는 -67.64 ~ 132.65의 범위로 나타났으며, T-P 부하량 결과는  $R^2$   $R^2$ 는 0.47 ~ 0.96, NSE는 -0.47 ~ 0.93, RSR은 0.26 ~ 1.21, PBIAS는 -81.46 ~ 134.74의 범위로 나타나, 일부 유역을 제외하고는 다중회귀분석에 의해 도출된 회귀식이 매개변수 추정에 적용가능 한 것으로 나타났다.

5. 또한, 인공신경망 기법을 이용하여 최적매개변수와 유역특성간의 관계를 분석하여 모형을 개발하였으며, 개발된 모형으로 매개변수를 추정하여 오염부하량을 모의하였다. 모의결과, T-N 부하량 결과는  $R^2$ 는 0.62 ~ 0.98, NSE는 0.12 ~ 0.97, RSR은 0.18 ~ 0.94, PBIAS는 -78.37 ~ 79.75의 범위로 나타났으며, T-P 부하량 결과는  $R^2$ 는 0.45 ~ 0.95, NSE는 -0.25 ~ 0.91, RSR은 0.30 ~ 1.12, PBIAS는 -79.53 ~

126.32의 범위로 나타나, 개발된 인공신경망 모형이 매개변수 추정에 적용가능 한 것으로 나타났다.

6. 개발된 두 가지 매개변수 추정방법과 LOADEST를 이용하여, 시범 유역을 대상으로, 개발된 회귀식의 적용성을 검토하였다. T-N 부하량 모의결과 LOADEST에 의해  $R^2$  0.92 ~ 0.97, NSE 0.83 ~ 0.97, RSR 0.18 ~ 0.42, PBIAS 9.20 ~ 19.59의 범위로 모의되었으며, 회귀식으로는  $R^2$  0.93 ~ 0.97, NSE 0.59 ~ 0.95, RSR 0.22 ~ 0.64, PBIAS -56.85 ~ 88.71의 범위로, 인공신경망으로는  $R^2$  0.92 ~ 0.98, NSE 0.89 ~ 0.95, RSR 0.22 ~ 0.34, PBIAS -19.80 ~ 14.13의 범위로 모의되는 것으로 나타났다. LOADEST에 의해 산정된 매개변수가 모의에 있어 좀 더 높은 신뢰도를 갖는 것으로 나타났으나, 다중회귀분석 및 인공신경망을 통해 추정된 매개변수를 이용한 식도 적용 가능한 범위에 있는 것으로 나타나 두 방법을 이용하는 것이 가능할 것으로 사료되었다.

7. T-P 부하량 모의결과 LOADEST에 의해  $R^2$  0.69 ~ 0.93, NSE 0.55 ~ 0.89, RSR 0.33 ~ 0.67, PBIAS -27.36 ~ 27.67의 범위로 나타났다으며, 회귀식으로는  $R^2$  0.64 ~ 0.93, NSE 0.54 ~ 0.87, RSR 0.36 ~ 0.68, PBIAS -51.06 ~ 38.00로, 인공신경망으로  $R^2$  0.65 ~ 0.91, NSE 0.35 ~ 0.82, RSR 0.42 ~ 0.81, PBIAS -53.48 ~ 51.79의 범위로 모의되는 것으로 나타났다. 모의 결과 통계적 변량은 3가지 방법 모두 유사한 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 신뢰할 만한 수준의 모의 결과 범위에 속하여 모형의 적용성이 있을 것으로 판단하였다.

본 연구에서 개발된 매개변수 추정방법은 통계적 변량을 통해 실측치를 잘 반영하여 모의되는 것으로 나타났으며, 실측치기반 매개변수에 의해 모의된 값과 유사한 모의 능력을 보이는 것으로 나타나, 오염부하량 모의에 있어 적용 가능할 것으로 사료된다. 향후, 본 연구에서 개발된 매개변수 추정방법과 LOADEST 회귀모형은 실측자료과 확보되지

많은 농업용 저수지 소유역에 대한 오염부하량 모의와 정책결정을 위한 스크린 모델로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

1. 강문성, 2002. 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모델을 이용한 오염총량모의시스템 개발, 서울대학교 박사학위논문.
2. 강문성, 김철겸, 2009. 최근 수질모델링 기법 및 연구동향, *KCID J.*, Vol. 16 (1), pp. 20-29.
3. 강문성, 박승우, 2003. 인공신경망 이론을 이용한 단기 홍수량 예측, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 45 (2), pp. 45-57.
4. 강문성, 조재필, 전종안, 박승우, 2009. 농업 소유역 격자단위 오염부하량 평가, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 51 (5), pp. 87-94.
5. 김민주, 김태근, 2014. BASINS/WinHSPF 모형을 이용한 비점오염물질 유출특성 분석과 최적관리기법 적용, *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 23 (2), pp. 88-100.
6. 김상민, 강문성, 박승우, 2003. 수질 모니터링과 원단위법을 이용한 농업 소유역의 오염부하량 추정, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 45 (3), pp. 94-102.
7. 김선주, 김필식, 윤찬영, 2000. 미계측유역의 일유출량 추정을 위한 탱크 모형 매개변수의 회귀식 산정, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
8. 김은정, 박배경, 신동석, 김용석, 류덕희, 2014. 동적모델을 이용한 수질오염총량제 목표수질 설정 및 할당부하량 산정방안 연구, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, Vol. 36 (9), pp. 629-640.
9. 김홍태, 신동석, 김용석, 2014. 강우 및 지역특성별 초기우수월류에 의한 오염부하 기여도 평가, *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 30 (6), pp. 622-631.
10. 박승우, 2006. 비점원 오염 모델의 종류와 적용방법, *물과 미래*, Vol 39 (12), pp. 19-26.
11. 박윤식, 2014. 유전자 알고리즘과 회귀식을 이용한 오염부하량의 예측,

- Korean J. Environ. Agric., Vol 33 (1), pp. 37-43.
12. 박윤식, 2014. 유전자 알고리즘과 회귀식을 이용한 오염부하량의 예측, Korean J. Environ. Agric., Vol. 33 (1), pp. 37-43.
13. 박윤식, 이지민, 정영훈, 신민환, 박지형, 황하선, 류지철, 박장호, 김기성, 2015. 한강수계에서의 부유사 예측을 위한 LOADEST 모형의 회귀식의 평가, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 57 (2), pp. 37-45.
14. 박재홍, 박준대, 류덕희, 정동일, 2009. 수질오염총량관리제의 성과평가: 개발/삭감계획의 이행실적 및 단위유역의 수질 현황, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 25 (4), pp. 481-493.
15. 박희성, 정상만, 정건희, 2014. 기후변화 시나리오와 신경망 모형을 이용한 미래 신적설일수와 최심신적설 빈도 분석, J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 14 (6), pp. 365-377.
16. 송인홍, 박병훈, 권순국, 1999. 농촌지역의 유량·부하량관계식 산정, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
17. 송혜원, 이해원, 최정현, 박석순, 2009. 유역관리에 따른 수질개선 효과분석을 위한 HSPF 모델 적용, J. of KSEE, Vol. 31 (5), pp. 358-363.
18. 신민환, 서지연, 최용훈, 김종건, 신동석, 이열재, 정명숙, 임경재, 최중대, 2009. 농촌유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모델의 적용성 평가, Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 25 (2), pp. 212-220.
19. 안지현, 2013. 유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발, 서울대학교 석사학위논문.
20. 이병주, 정일원, 배덕효, 2009. 다변량 통계분석을 이용한 준분포형 유출 모형 매개변수 지역화, 한국수자원학회논문집, Vol. 42 (2), pp. 149-160.
21. 이은정, 2011. SWAT 모형과 무제약 조건 최적화를 이용한 유역 비점오염원 관리, 서울대학교 박사학위논문.
22. 이은정, 강문성, 박정안, 최진영, 박승우, 2010. 인공신경망 기법을 이용한 장래 잠재증발산량 산정, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 52 (5), pp. 1-9.

23. 이은정, 김태근, 2012. 유역모형을 이용한 비점배출계수 적용성 평가, 환경영향평가, Vol. 21 (3), pp. 339-352.
24. 장원석, 류지철, 강현우, 이지원, 김기성, 임경재, 2011. 효과적인 하천 오염부하량 산정 위한 NI 방법 및 ESTIMATOR, LOADEST 모형 적용 및 평가, Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences, Vol. 23 (1), pp. 1-10.
25. 정한석, 2014. 사회-수문시스템 모델링을 이용한 하수재이용 유역의 수문특성 분석, 서울대학교 박사학위논문.
26. 조범준, 조홍연, 강성현, 2007. 수질자료 결측구간의 오염부하 추정기법 비교평가, 한국해안·해양공학회지, Vol 19 (1), pp. 45-56.
27. 조재명, 이미란, 윤홍식, 2011. 격자기반의 지형 및 지리정보자료와 GIS 분석기법을 이용한 유역의 유출량 및 오염부하량 추정, 한국측량학회지, Vol. 29 (4), pp. 381-392.
28. 한미덕, 손지영, 류지철, 안기홍, 김용석, 2014. 하천 수질 및 부하량에 미치는 유역 내 오염원의 영향, J. Kor. Soc. Environ. Eng., Vol. 36 (9), pp. 648-658.
29. 환경부, 1995. 비점오염원 조사연구사업 보고서.
30. 환경부, 2006. 물환경관리 기본계획.
31. 환경부, 2004. 수질오염총량관리제도.
32. Bhaduri, B., Harbor, J., Engel, B., Grove, M., 2000. Assessing Watershed-Scale, Long-Term Hydrologic Impacts of Land-Use Change Using a GIS-NPS Model, Environmental Management, Vol. 26 (6), pp. 643-658.
33. Bouraoui, F., Grizzetti, B., 2014. Modelling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture, Science of the Total Environment, Vol. 468-469, pp. 1267-1277.
34. Carey, R. O., Migliaccio, K. W., Brown, M. T., 2011. Nutrient discharges to Biscayne Bay, Florida: Trends, loads, and a pollutant index, Science of the Total Environment, Vol. 409, pp. 530-539.
35. Cohn, T. A., Delong, L. L., Gilroy, E. J., Hirsch, R. M., Wells, D. K.,

1989. Estimating Constituent Loads, *Water Resources Research*, Vol. 25 (5), pp. 937-942.
36. Das, S. K., Ng, A. W. M., Perera, B. J. C., Adhikary, S. K., 2013. Effects of climate and landuse activities on water quality in the Yarra River catchment,
37. Ferguson, R. I., 1986. River Loads Underestimated by Rating Curves, *Water Resources Research*, Vol. 22 (1), pp. 74-76.
38. Ferguson, R. I., 1987. Accuracy and Precision of Methods for Estimating River Loads, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, pp. 95-104.
39. Gupta, K., Saul, A. J., 1995. Specific Relationships for the First Flush Load in Combined Sewer Flows, *Wat. Res.*, Vol. 30 (5), pp. 1244-1252.
40. Harmel, R. D., King, K. W., Haggard, B. E., Wren, D. G., Sheridan, J. M., 2006. Practical Guidance for Discharge and Water Quality Data Collection on Small Watersheds, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 49 (4), pp. 937-948.
41. Hatt, B. E., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Taylor, S. L., 2004. The Influence of Urban Density and Drainage Infrastructure on the Concentrations and Loads of Pollutants in Small Streams, *Environmental Management*, Vol. 34 (1), pp. 112-124.
42. Helsel, D. R., Hirsch, R. M., 2002. *Statistical Methods in Water Resources*.
43. Im, S. J., Brannan, K. M., Mostaghimi, S., Kim, S. M., 2007. Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff and sediment yield prediction, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42: 1561-1570.
44. Joo, M., Raymond, M. A. A., McNeil, V. H., Huggins, R., Turner, R. D. R., Choy, S., 2012. Estimates of sediment and nutrient loads in 10 major catchments draining to the Great Barrier Reef during 2006-2009, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 65, pp. 150-166.

45. Karim, C. A., Jing, Y., Ivan, M., Rosi, S., Konrad, B., Johanna, M., Juerg, Z., Raghavan, S., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT, *Journal of Hydrology*, 333: 413-430.
46. Lee, H. J., Masuda, T., Yasuda, H., Hosoi, Y., 2014. The pollutant loads from a paddy field watershed due to agricultural activity, *Paddy Water Environ*, Vol. 12, pp. 439-448.
47. Maniquiz, M. C., Lee, S., Kim, L. H., 2010. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 22 (6), pp. 946-952.
48. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50 (3), pp. 885-900.
49. Oh, J., Sankarasubramanian, A., 2012. Interannual hydroclimatic variability and its influence on winter nutrient loadings over the Southeast United States, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 16, pp. 2285-2298.
50. Oh, J., Sinha, T., Sankarasubramanian, A., 2014. The role of retrospective weather forecasts in developing daily forecasts of nutrient loadings over the southeast US, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 18, pp. 2885-2898.
51. Park, Y. S., Engel, B. A., 2014. Use of Pollutant Load Regression Models with Various Sampling Frequencies for Annual Load Estimation, *Water*, Vol. 6, pp. 1685-1697.
52. Patrick, L. B., Teresa, H. S., 2002. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA, *Water Research* 36: 1743-1757.

53. Que, Z., Seidou, O., Droste, R L., Wilkes, G., Sunohara, M., Topp, E., Lapen, D. R., 2015. Using AnnAGNPS to Predict the Effects of Tile Drainage Control on Nutrient and Sediment Loads for a River Basin, *J. Environ. Qual.*, Vol. 44, pp. 629-641.
54. Robertson, D. M., 1997. Regionalized Loads of Sediment and Phosphorus to Lakes Michigan and Superior—High Flow and Long-term Average, *J. Great Lakes Res.*, Vol. 23 (4), pp. 416-439.
55. Robertson, D. M., 2003. Influence of Different Temporal Sampling Strategies on Estimating Total Phosphorus and Suspended Sediment Concentration and Transport in Small Streams, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39 (5), pp. 1281-1308.
56. Shen, Z., Chen, L., Hong, Q., Qiu, J., Xie, H., Liu, R., 2013. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area, *Science of the Total Environment*, Vol. 454-455, pp. 383-392.
57. Shen, Z., Liao, Q., Hong, Q., Gong, Y., 2012. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China, *Separation and Purification Technology*, Vol. 84, pp. 104-111.
58. Srivastava, P., Migliaccio, K. W., ?im?nek, J., 2007. Landscape Models for Simulating Water Quality at Point, Field, and Watershed Scales, Vol. 50 (5), pp. 1683-1693.
59. Stenback, G. A., Crumpton, W. G., Schilling, K. E., Helmers, M. J., 2011. Rating curve estimation of nutrient loads in Iowa rivers, *Journal of Hydrology*, Vol. 396, pp. 158-169.
60. Sun, C., Shen, Z., Liu, R., Xiong, M., Ma, F., Zhang, O., Li, Y., Chen, L., 2013. Historical trend of nitrogen and phosphorus loads from the upper Yangtze River basin and their responses to the Three Gorges Dam, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, Vol. 20, pp. 8871-8880.
61. Zhang, P., Liu, Y., Pan, Y., Yu, Z., 2013. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural

non-point source pollution control, *Mathematical and Computer Modelling*,  
Vol. 58, pp. 588-595.

# Abstract

## Estimation of LOADEST Coefficient for Simulating Pollutant Loads in Ungauged Watersheds

Kyeung, Kim

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The objective of this study was to estimate LOADEST (LOAD Estimator) coefficient for simulating pollutant loads in ungauged watersheds. Regression models of LOADEST were used to simulate pollutant loads, and the multiple linear regression (MLR) and artificial neural network (ANN) was used for coefficient estimation on watershed characteristics.

The fifth and third model of LOADEST were selected to simulate T-N and T-P loads, respectively. Eighty one watersheds were selected to estimate model coefficient using MLR and ANN, and simulate pollutant loads. The results and statistics indicated that regression models based on LOADEST simulated pollutant loads reasonably and model coefficients were reliable. However, the results also indicated that LOADEST underestimated pollutant loads and had a bias. For this reason, simulated loads were corrected the bias by a quantile mapping method in this study. Corrected loads indicated that

the bias correction was effective.

Using multiple regression analysis and artificial neural networks, a coefficient estimation methods according to the watershed characteristic were developed. Coefficients which calculated by MLR and ANN were used in models. The simulated result and statistics indicated that both MLR and ANN estimated the model coefficients reasonably. Regression models developed in this study would help simulate pollutant loads for ungauged watersheds and be a screen model for policy decision.

Keywords : Regression model, Pollutant loads, LOADEST, MLR,  
ANN

*Student number* : 2013-23256