

농촌유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모델의 적용성 평가

신민환^{*} · 서지연^{*} · 최용훈^{*} · 김종건^{*} · 신동석^{*} · 이열재^{*} · 정명숙^{**} · 임경재^{*} · 최중대[†]

국립환경과학원 금강물환경연구소

^{*}강원대학교 농업생명과학대학

^{**}국립환경과학원 한강물환경연구소

Evaluation of LOADEST Model Applicability for NPS Pollutant loads Estimation from Agricultural Watershed

Min hwan Shin · Ji yeon Seo^{*} · Yong hun Choi^{*} · Jonggun Kim^{*} · Dongsuk Shin ·
Yeoul-Jae Lee · Myung-Sook Jung^{**} · Kyoung Jae Lim^{*} · Joongdae Choi[†]

Geum-River Environment Research Laboratory

^{}Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University*

*^{**}Han-River Environment Research Laboratory*

(Received 25 September 2008, Revised 15 January 2009, Accepted 24 January 2009)

Abstract

In many studies, the Numeric Integration (NI) method has been widely used to calculate pollutant loads from the watershed because it is easy to apply. However, there have been many needs for more accurate pollutant loads estimation method with the restricted number of water quality samples. However, the ESTIMATOR model does not allow the users to define the regression model to explain the measured flow and water quality relationship, indicating the ESTIMATOR model is not flexible. The LOADEST model allows the user to choose the model type from 11 predefined general forms of regression equations. Annual loads of T-N and T-P with the LOADEST model were 0.70 times and 0.84 times of those by NI method, respectively. The coefficient of determination (R^2) of the LOADEST regression for the T-N and T-P were 0.92 and 0.72, respectively. This indicates that the load estimation regression model with the LOADEST for the study watershed explains the relationship between the observed flow and water quality data well reasonably well. Based on these findings, we suggest that the LOADEST model estimated regression equation could be used to estimate pollutant loads using the measured flow data for the study watershed.

keywords : ESTIMATOR model, LOADEST model, Numeric IntegrationI method, Pollutant loads

1. 서론

정부는 '4대강 물관리종합대책'(98~05)을 비롯해 세계 최초로 전국을 대상으로 하는 '수질오염총량제', 그리고 비점오염원의 비율이 상대적으로 높은 지역을 비점오염원 특별관리지역으로 지정하는 '4대강 비점오염원관리종합대책' 등 수질개선을 위한 지속적인 노력을 하고 있다. 이와 같은 정부의 노력에도 불구하고 전체 오염부하 중 42~69%의 비율을 차지하는 비점오염원에 대한 정확한 구명과 자료조사가 부족하여 수질개선은 예상보다 빠르게 개선되지 못하는 실정이다(환경부, 2006). 따라서 수질개선을 위해서는 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원에 대해서도 영향인자 구명과 자료조사 그리고 모니터링을 통한 정량적인 평가가 수행되어야 한다(신민환 등, 2007). 이러한 비점오염원은 오염물

의 종류, 독성, 발생량, 강우강도, 강우지속시간, 강우수질, 유달거리, 개발지역의 유무 등에 따라 유역수질환경에 미치는 영향이 크게 달라진다(최중대 등, 1999). 따라서 연구유역에 대한 장기간의 현장조사 그리고 실측유량 및 수질 자료 등이 충분히 측정되지 않을 경우 유역에서 발생하는 오염부하량 산정시 많은 오차가 발생할 수 있다(노상덕 등, 2006). 이러한 문제를 해결하기 위하여 환경부(2008)는 오염부하량 증감 내역을 파악하고 예측하여 이행평가 및 향후 개발계획 수립 등에 활용하기 위하여 정확한 오염부하량 산정을 위한 많은 노력을 기울이고 있다.

지금까지 오염부하 산정을 위하여 많은 연구자들은 적용하기 쉬운 오염부하 산정방법인 NI 방법을 사용하였다(Cohn et al., 1989, 1992a; Shin et al., 2005a). NI 방법은 유량과 수질분석 횟수와 정밀도가 높을 경우 오염부하를 산정하는데 효과적이다(Haggard et al., 2003). Roman-Mas 등(1994)은 NI 방법으로 정확한 오염부하를 산정할 경우 한 번의 강우사상에 20개 이상의 수질샘플이 있어야 5%

[†] To whom correspondence should be addressed.
jdchoi@kangwon.ac.kr

이하의 오차로 오염부하를 산정할 수 있다고 하였다. 그러나 NI 방법으로 정확한 오염부하를 산정하기 위해서는 시간과 인력부족 그리고 비용문제로 인해 강우사상당 많은 수의 수질분석을 수행할 수 없는 문제점이 있다. 이러한 NI의 문제점으로 인해 Shin 등(2005b)은 회귀식 기반 ESTIMATOR 모델(Cohn et al., 1989)을 활용하여 유역에서의 오염부하량 산정 적용성을 평가하였다. ESTIMATOR 모델은 소량의 수질분석 자료와 유량자료를 이용하여 유역의 오염부하를 산정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 농도와 유량과의 상관관계를 식으로 표현할 때 수질분석과 유량자료의 수에 상관없이 이미 정해져 있는 7 parameter 모형을 사용하기 때문에 유연성이 부족하다. 반면, LOADEST 모델은 유역에서의 오염부하 산정시 ESTIMATOR 모델의 단점을 보완하여 11가지 회귀식을 제시하고, 유역의 특성에 맞게 농도와 유량과의 상관관계를 가장 잘 표현하는 회귀식을 자동으로 선택하여 유역의 오염부하 변화를 평가하는데 활용될 수 있다. 또한 Donato and MacCoy(2005)의 보고에 따르면 유량과 농도, 그리고 시간 등의 입력 자료에 대하여 시·공간적으로 분석하여 연속적인 오염부하에 대한 정보를 제공한다고 하였다. 그리하여 LOADEST 모델은 기존 NI 방법과 ESTIMATOR 방법에 비해 보다 객관적이고 정확한 오염부하 산정이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 연구대상 유역에서의 실측 유량 및 수질자료를 이용하여 NI 방법과 ESTIMATOR 모델, 그리고 LOADEST 모델을 이용하여 오염부하를 산정하고, 산정된 오염부하를 비교·분석하여 농촌 소유역에서의 오염부하 산정시 LOADEST 모델의 적용성을 평가하는데 있다.

2. 연구방법

2.1. 문헌연구

2.1.1 Numeric Integration(NI) 방법

기존 여러 연구에서는 오염부하를 산정할 때 적용성이 쉽고 편리한 NI 방법을 이용하였다. NI 방법은 전체 오염부하량을 산정하기 위해 유량과 수질자료가 조사된 전체

시간을 세분화하여 각 세분류 구간의 구간별 대표농도를 그 시간에 측정된 실측 수질 농도로 하여 오염부하를 산정한다. NI 방법을 이용한 오염부하산정은 기존의 다른 방법에 비해 적용성이 쉬운 장점이 있으나 연간 모든 강우사상마다 샘플링 빈도수가 100회 또는 100회 이상 샘플링이 되어야 정확한 오염부하를 산정할 수 있어 적은 수의 샘플링에 의한 오염부하 산정에 적용하기에는 한계가 있다(Haggard et al., 2003). Shin 등(2005b)은 Fig. 1과 같이 초기 강우발생시점과 강우 발생 후 오염원의 농도가 크게 변할 수 있기 때문에 강우시 충분한 수의 샘플을 채취하지 않으면 오염부하를 산정할 때 실제의 오염부하 값과 달라질 수 있다고 하였다.

2.1.2. ESTIMATOR 모델

ESTIMATOR 모델은 연구기간 동안 분석된 실측 유량자료와 수질자료를 이용하여 오염부하를 산정한다. 이 ESTIMATOR 모델은 USGS의 7 parameter regression 방법을 이용하여 $\ln(C)$ 와 $\log(Q)$, $\log(Q^2)$, time, $time^2$, 그리고 계절적 영향과의 관계를 분석하여 회귀식을 추출해낸다. ESTIMATOR 모델의 입력 자료는 실측 유량 및 농도, 그리고 부하량이 산정될 연구 기간에 대한 날짜와 일평균 유량자료이다. 그리고 일평균 유량과 실측 농도자료가 ESTIMATOR 모델의 입력 자료로 이용되어 MVUE bias correction 방법(Gilroy et al., 1990)을 이용하여 각각의 날짜에 대해서 일 부하량을 산정한다. 그러나 ESTIMATOR 모델은 오염부하를 산정하는 과정에서 수질농도와 유량과의 상관관계를 식으로 표현할 때 유량자료와 수질농도의 수에 상관없이 한 가지의 7 parameter regression 모형으로 정해져 있는 식과 독립변수만을 사용하기 때문에 실측 유량과 실측 농도와의 관계를 설명하기엔 한계가 있을 수 있다.

2.1.3. LOADEST 모델

LOADEST 모델은 유량과 시간에 따라 변화하는 하천의 오염부하를 산정하기 위해 개발된 회귀식 기반 오염부하 산정 프로그램이다(Runkel et al., 2004). 이 LOADEST 모

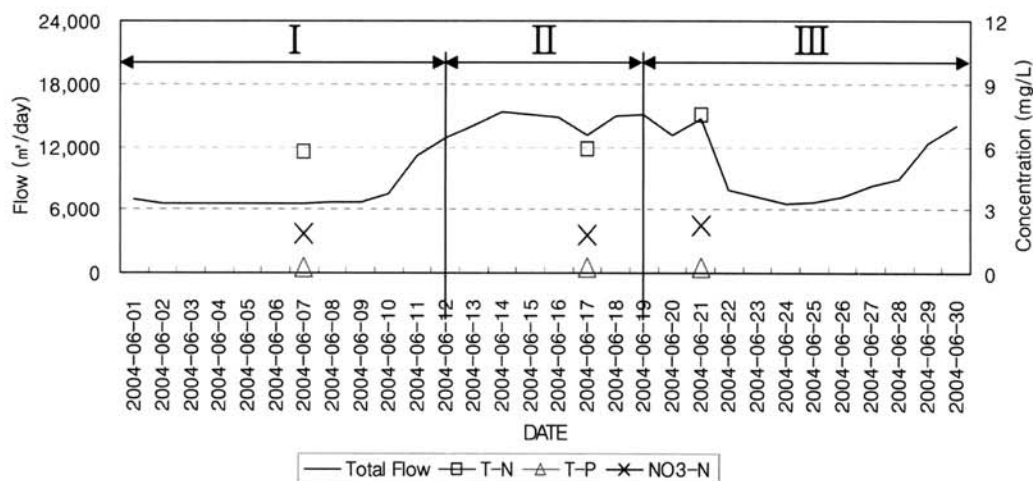


Fig. 1. Stream flow and representative water quality data for NI method (Shin et al., 2005b).

델은 사용자가 원하는 기간 동안의 오염부하를 산정할 수 있고, 잔차 분석을 비롯한 데이터의 통계적인 분석을 통해 선정된 모델의 적절성을 평가한다. 또한 월별로 산정된 오염부하의 적절성에 대하여 월평균 오염부하의 데이터와 95% 신뢰수준에 대한 통계적인 분석이 가능하다. 이 LOADEST 모델의 입력자료는 Control file, Calibration file, Estimation file, 그리고 Header file로 구성되어 있다. Control file은 다양한 입력 파일의 파일정보를 저장하고 있다. 그리고 Calibration file은 해당 유역에서 유량 및 수질 농도와의 관계를 설명해 줄 수 있는 최적의 모형을 결정하는데 활용되며 실측 수질농도 자료가 많으면 보다 정확히 대표 모형을 찾을 수 있다. LOADEST 모형에서는 오염부하를 산정할 때 Adjusted Maximum Likelihood Estimation (AMLE)와 Maximum Likelihood Estimation(MLE), 그리고 Least Absolute Deviation(LAD)의 방법이 사용되는데, AMLE는 Calibration file에서 데이터의 이상치 또는 오류치를 수정했을 때 사용되고, 실측 수질 자료를 그대로 사용했을 경우는 MLE 방법이 사용된다. 또한 LAD 방법은 잔차가 정규분포를 따르지 않을 때 사용된다(Cohn et al., 1992b; Cohn, 2005). Estimation file은 선정된 최종 모형을 활용하여 실측 및 예측 유량으로 오염부하량을 산정할 때와 일별, 월별, 그리고 연 오염부하량을 산정하는데 이용된다. Header file은 LOADEST 모델을 실행하는데 필요한 입력 정보를 담고 있다. 계절적인 영향을 고려하기 위해 기간을 설정하고, 결과물의 오염부하와 농도의 단위를 결정하는데 Header file이 사용된다. 또한 오염부하 산정을 위한 식을 자동으로 선택할 것인지 아니면 11가지 식 중 하나를 선택할 것인지를 결정한다. 4개의 입력파일을 준비한 후 LOADEST 모델을 실행하게 되면 echo file, constituent file, residual file 그리고 individual load file의 출력파일이 생성된다. echo file에는 설정한 입력데이터들에 대한 정보가 저장되며 실행단계에서 발생하는 에러에 대한 정보도 저장되어 잘못 입력된 데이터를 쉽게 찾아낼 수 있다. constituent file은 두 개의 구성요소로 구분되어 있는데 첫 부분은 오염부하를 산정하는데 있어 다양한 방법으로 회귀

식을 산정하는 과정을 기록하며, 뒷부분은 산정된 월별 평균 오염부하를 출력한다. 그리고 residual file은 calibration file에 입력된 데이터들의 잔차에 관한 내용을 기록한다. 마지막으로 individual file은 입력한 날짜와 유량 그리고 산정된 일 오염부하를 출력한다. Fig. 2는 LOADEST 모델의 입력 자료와 출력자료를 보여주는 그림이다.

2.2. 연구유역 선정 및 유역 모니터링

LOADEST 모델의 오염부하 평가의 적용성을 평가하기 위하여 강원도 춘천시에 소재한 월곡리 유역 소하천을 대상으로 유량측정 및 수질 분석을 수행하였다. 월곡리의 유역면적은 341 ha으로 유역경사가 급하고 농지규모가 작은 농촌유역의 특성을 지니고 있다. 월곡리 유역의 점오염원으로는 춘천 옥광산과 무의탁 노인을 수용하고 있는 무지개 마을에서의 하천으로 배출되는 오염원이 있다. 유역내의 논 면적은 8.75 ha, 밭 면적은 35.18 ha, 임야면적은 260.7 ha 그리고 도로면적은 2.09 ha등으로 조사되었다. 월곡리 유역의 유량산정을 위하여 유역 출구 지점에 독일 OTT사의 Orphimedes 압력식 수위계를 설치하였으며, 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일 강우시 5분 간격, 비강우시 30분 간격으로 수위를 측정하였으며, 이를 유량으로 환산하였다. 겨울철 동파로 인해 모니터링 시설 설치가 불가능한 기간에는 2주일 간격으로 1회씩 유량을 측정하였다. 또한 수질 측정을 위해 강우시와 비강우시에 55개의 수질시료를 채취하여 환경부 제정 수질공정시험법의 제반 규정에 따라 T-N과 T-P 항목을 분석하였다(환경부, 1996). Fig. 3은 본 연구의 대상 유역인 월곡리 유역 경계를 보여주고 있으며, Fig. 4는 월곡리 유역의 수질채취와 수위측정을 위한 모니터링 시설 설치 모습이다.

2.3. 오염부하산정

본 연구에서는 기존 오염부하산정 방법들의 단점을 보완할 수 있는 LOADEST 모델을 이용하여 오염부하를 산정하였고, 이를 NI 방법과 ESTIMATOR 모델을 이용하여 산정한 오염부하량과 비교 분석하였다.

2.3.1. NI 방법

2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 측정된 일 유량자료와 55개의 T-N과 T-P의 수질자료를 이용하여 NI 방법으로 오염부하를 산정하였다. 오염부하 산정을 위해 본 연구에서 사용된 NI 방법의 식은 식 (1)과 같다.

$$\text{Load} = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (1)$$

여기서, c_i 는 i 번째의 농도이고, q_i 는 구간유량, t_i 는 $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는 i 번째 샘플로써 표현되는 시간 구간이다.

NI 방법을 이용하여 오염부하 산정 시 각 구간별 대표농

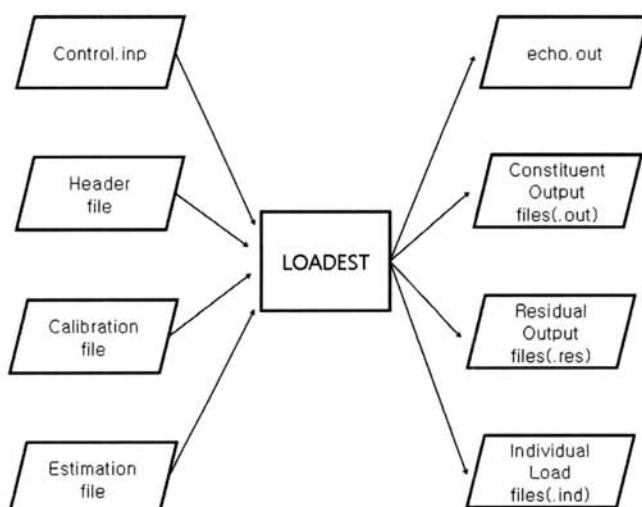


Fig. 2. Input and Output files in LOADEST model.

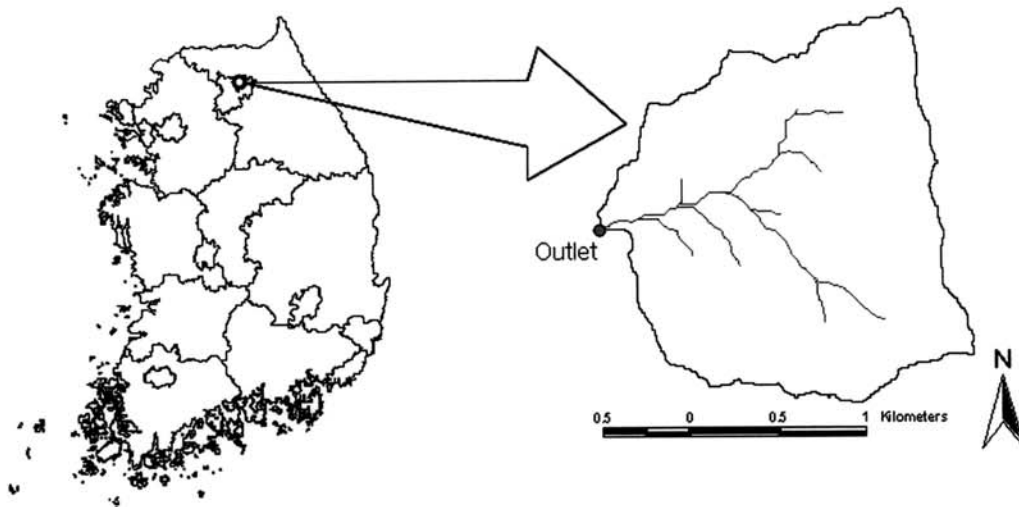


Fig. 3. Location of study watershed.



Fig. 4. Flow and automatic water sampler installed at the outlet of Wolgok-ri watershed.

도는 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 해당 실측 샘플링 이전 및 이후 기간 사이의 대표농도로 그 해당 실측 농도가 이용되어 오염부하량이 산정된다. 이 방법은 강우에 따른 유

출시작 및 침투유량 발생, 그리고 직접유출 종료 후 강우 사상당 많은 수의 수질 샘플이 분석되었을 경우 유역에서의 오염부하 특성을 정확히 산정할 수 있으나, 충분한 수

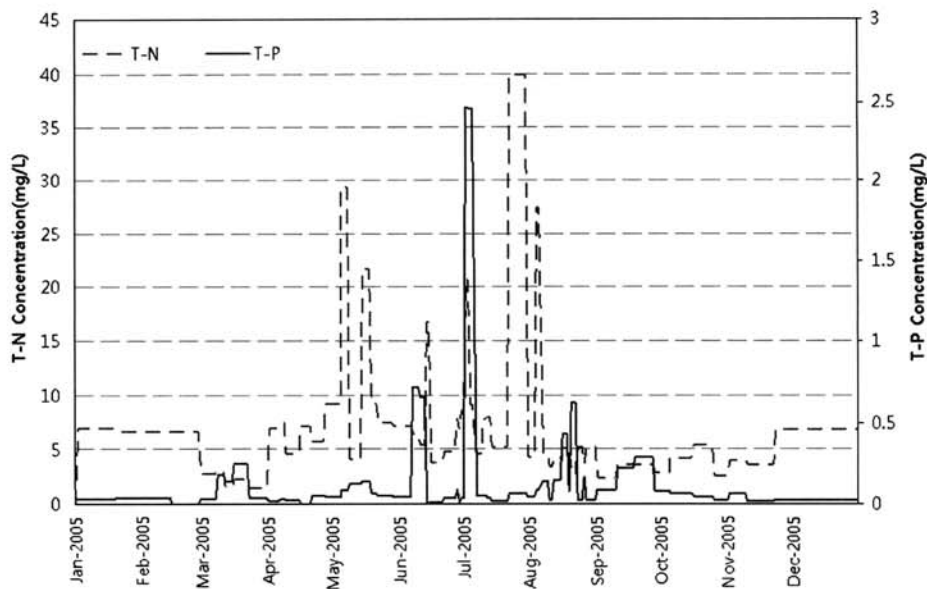


Fig. 5. Constant T-N and T-P concentration values for each time interval used in NI method for pollutant load estimation.

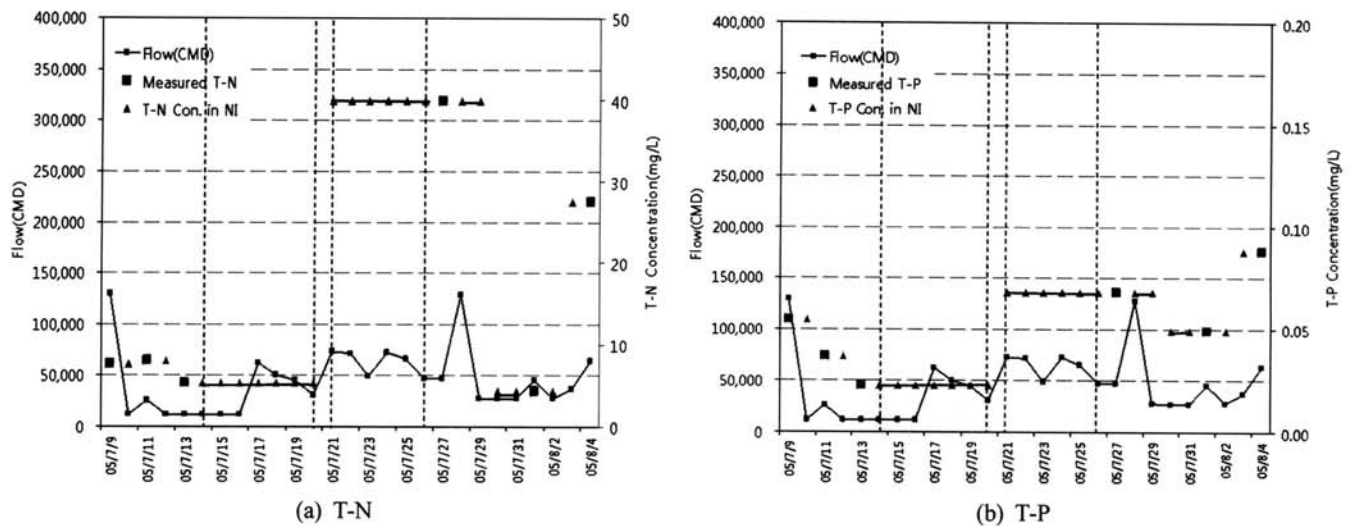


Fig. 6. Constant T-N and T-P concentration values for time intervals during summer for pollutant load estimation.

의 수질 샘플을 채취하지 못했을 경우 강우시 수질시료를 채취하였을 때의 농도가 수질시료가 채취되지 않은 비강우시에도 영향을 주기 때문에, 수질 농도의 변화를 유동성 있게 반영하여 오염부하를 산정하지 못하는 단점이 있다.

또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 1주일에 한 번 또는 그 이상의 간격을 두고 샘플채취를 하여 수질분석을 할 경우 고농도로 산정된 농도가 강수량과 그에 따른 유량증가에 상관없이 1주일 이상 오염부하를 산정하는데 영향을 미치게 되어 일별, 월별 그리고 연간오염부하의 값이 경우에 따라서는 실제의 오염부하량보다 크게 산정될 수도 있고, 작게 산정될 수도 있다. 따라서 NI 방법을 이용하여 정확한 오염부하를 산정하기 위해서는 강우에 따른 유출시작 및 침투유량 발생, 그리고 직접유출 종료 후 강우사상당 다수의 수질 채취를 통해 오염원의 농도변화를 고려하여 오염부하를 산정해야 한다.

2.3.2. ESTIMATOR 모델

오염부하 산정을 위해 ESTIMATOR 모델에 사용된 입력 자료는 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 측정된 일 유량자료와 55개의 T-N과 T-P의 수질자료를 이용하여 오염부하량을 산정하였다(식 (2)).

$$\ln[L] = \beta + \beta_1 \ln\left(\frac{Q}{\bar{Q}}\right) + \beta_2 \ln\left(\frac{Q}{\bar{Q}}\right)^2 + \beta_3 \ln[T - \bar{T}] + \beta_4 \ln[T - \bar{T}]^2 + \beta_5 \sin[2\pi T] + \beta_6 \cos[2\pi T] + e \tag{2}$$

여기서, $\ln[]$ 는 매개변수의 자연로그이고, L은 오염부하(kg/day), Q는 유량(cfs), T는 측정시간, $\beta_0 \sim \beta_6$ 은 회귀식을 결정하기 위해 산정된 변수, 그리고 \bar{Q} 와 \bar{T} 는 중간값을 나타낸다.

2.3.3. LOADEST 모델

오염부하 산정을 위해 LOADEST 모델에 사용된 Calibration file 입력 자료는 월곡리 유역에서 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 1년 동안 55회 채취된 T-N과 T-P의 농도와 유량자료를 이용하여 LOADEST 모델의 입력자료인 Calibration file을 준비하였다. LOADEST 모델의 4개의 입력파일 중, Control file에서 사용된 유량과 농도의 단위는 각각 cfs와 mg/L이고, LOADEST 모델로 산정된 오염부하량의 단위는 kg/day이다. 그리고 Header file에서 우리나라 강우 특성에 맞게 7-9월의 모델회귀방정식을 적용하여 계절적인 영향을 고려하였으며, 모델에 사용된 11가

Table 1. LOADEST regression model equation - The header file

Model number	Regression model
1	$a_0 + a_1 \ln Q$
2	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2$
3	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \text{dtime}$
4	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_3 \cos(2\pi \text{dtime})$
5	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \text{dtime}$
6	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime})$
7	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_3 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_4 \text{dtime}$
8	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_5 \text{dtime}$
9	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_5 \text{dtime} + a_6 \text{dtime}^2$
10	$a_0 + a_1 \text{per} + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q \text{ per}$
11	$a_0 + a_1 \text{per} + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q \text{ per} + a_4 \ln Q^2 + a_5 \ln Q^2 \text{ per}$

$\ln(Q) = \ln(\text{streamflow})$ - center of $\ln(\text{streamflow})$, $\text{dtime} = \text{decimal time} - \text{center of decimal time}$, $\text{per} = \text{period}$

지 회귀식 중 잔차가 가장 적은 회귀식이 최종 선정되었다. LOADEST 모델에 사용되는 11가지 식은 Table 1과 같다. 또한 Individual file에서 산정된 일 오염부하를 NI 방법과 ESTIMATOR 모델을 이용하여 산정한 오염부하량과 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출특성 및 농도특성

연구기간 동안의 월곡리 유역에 1,334 mm의 강수와 4,399,690 m³의 유출이 발생하였다. 7~8월의 장마기간 동안 연 강수량의 49.3%에 해당하는 강수량과 연간 총 유출량의 53.8%의 유출이 발생하였다. 이는 우리나라의 여름철에 집중적으로 내리는 강우유출 특성이다. 월곡리 유역의 실측된 T-N과 T-P 농도는 각각 1.54~39.84 mg/L와 0.001~2.457 mg/L의 범위를 보였고, 월평균 유량 가중 평균농도는 다음 Table 2와 같다. 이 중 7월의 유량 가중 평균농도는 연구유역의 논과 밭 등의 비점오염원이 하천으로 유입되어, 농도가 매우 높아진 것으로 판단된다.

Table 2. Monthly flow weighted mean concentration (FWMC) of the study watershed (Unit: mg/L)

Month	FWMC of T-N	FWMC of T-P
Jan. 2005	6.85	0.04
Feb. 2005	6.41	0.02
Mar. 2005	2.32	0.12
Apr. 2005	6.30	0.03
May. 2005	15.41	0.06
Jun. 2005	5.65	0.07
Jul. 2005	22.29	0.62
Aug. 2005	6.90	0.24
Sep. 2005	2.90	0.23
Oct. 2005	3.19	0.07
Nov. 2005	4.51	0.04
Dec. 2005	6.80	0.03
Annual FWMC	11.41	0.30

3.2. 오염부하산정

3.2.1. NI 방법

NI 방법을 이용하여 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 월곡리 유역의 T-N과 T-P의 월별 오염부하와 연간 오염부하를 산정하였다(Table 3). 7월에 산정된 T-N과 T-P의 오염부하는 연 오염부하의 62.8%와 66.9%로 매우 높게 산정되었다. 이는 NI 방법의 단점으로 앞에서 지적되었듯이

Table 3. Pollutant loads estimated NI method (Unit: kg/ha)

Month	NI method	
	T-N	T-P
Jan. 2005	1.04	0.005
Feb. 2005	0.86	0.003
Mar. 2005	1.21	0.064
Apr. 2005	3.96	0.019
May. 2005	13.44	0.060
Jun. 2005	4.61	0.054
Jul. 2005	92.90	2.591
Aug. 2005	19.36	0.612
Sep. 2005	6.28	0.410
Oct. 2005	1.65	0.039
Nov. 2005	1.28	0.013
Dec. 2005	1.29	0.006
Annual total	147.88	3.876

강우에 따른 유출시작 시점에 수질 채취를 하지 않은 경우 강우가 지속되는 기간의 고농도 수질이 강우시 분석된 고농도의 수질이 비강우시에도 영향을 미치어(Fig. 7) 월 오염부하와 연 오염부하가 매우 높게 산정된 것으로 판단된다.

3.2.2. ESTIMATOR 모델

오염부하를 산정하기 위해 ESTIMATOR 모델을 이용하여 산정된 회귀식의 매개변수는 Table 4와 같다. 또한 실측자료와 ESTIMATOR 모델에 의해 산정된 예측치와의 비교 결과 T-N의 결정계수(Coefficients of determination: R²)의 값은 0.91로 실측자료와 예측자료간의 상관관계가 높은 것으로 나타나, ESTIMATOR 모델을 이용하여 월곡리 유역의 오염부하를 산정하는데 적용할 수 있을 것으로 판단된다. T-P의 경우 R²가 0.71로 점오염원의 요인으로 인해 모형이 유량 및 수질 농도와의 관계를 잘 설명하지 못하는 것으로 판단된다.

월곡리 유역의 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 T-N과 T-P의 월별 오염부하와 연간 오염부하는 Table 5와 같이 나타났다. 이 중 7월의 T-N과 T-P의 오염부하는 연 오염부하량의 41.8%와 39.6%로 나타났다.

3.2.3. LOADEST 모델

LOADEST 모델을 이용하여 월곡리 유역의 T-N과 T-P의 오염부하량을 산정하였다(Table 6). 실측자료와 LOADEST 모델에 의해 산정된 예측치와의 비교결과 T-N의 경우 R² 값이 0.92로 높게 나와, 향후 LOADEST 모델을 이용하여 월곡리 유역의 유출량만으로 T-N 오염부하량을 산정할 수

Table 4. Regression coefficient for loads of ESTIMATOR method

Items	Regression coefficient						
	β	β ₁	β ₂	β ₃	β ₄	β ₅	β ₆
T-N	2.2538	1.0877	0.0341	0.3301	22.6902	0.7738	-2.2195
T-P	-0.1455	1.0986	0.2060	-1.0059	-11.0758	-0.6369	0.3270

$$\ln[L] = \beta + \beta_1 \ln\left(\frac{Q}{Q_0}\right) + \beta_2 \ln\left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 + \beta_3 \ln[T - \bar{T}] + \beta_4 \ln[T - \bar{T}]^2 + \beta_5 \sin[2\pi T] + \beta_6 \cos[2\pi T] + e$$

Table 5. Pollutant loads estimated ESTIMATOR model method (Unit: kg/ha)

Month	ESTIMATOR model	
	T-N	T-P
Jan. 2005	0.95	0.008
Feb. 2005	0.53	0.012
Mar. 2005	2.25	0.033
Apr. 2005	4.74	0.078
May. 2005	8.64	0.118
Jun. 2005	8.45	0.109
Jul. 2005	43.52	1.288
Aug. 2005	19.69	0.945
Sep. 2005	8.24	0.553
Oct. 2005	1.99	0.097
Nov. 2005	1.61	0.010
Dec. 2005	3.58	0.001
Annual total	104.20	3.252

Table 6. Pollutant loads estimated LOADEST model method (Unit: kg/ha)

Month	LOADEST model	
	T-N	T-P
Jan. 2005	0.69	0.006
Feb. 2005	0.74	0.006
Mar. 2005	2.40	0.015
Apr. 2005	4.34	0.039
May. 2005	6.59	0.059
Jun. 2005	5.31	0.051
Jul. 2005	27.92	0.595
Aug. 2005	14.18	0.406
Sep. 2005	6.63	0.258
Oct. 2005	1.60	0.050
Nov. 2005	0.76	0.012
Dec. 2005	0.77	0.006
Annual Total	71.94	1.504

Table 7. Regression coefficients and coefficient of determination (R²)

Items	Regression coefficient							R ²
	a	b	c	d	e	f	g	
T-N	3.1288	0.9650	0.1123	-0.3111	1.2299	0.2657	8.0208	0.92
T-P	-0.7881	1.1096	0.207	0.3117	0.2424	-0.2401	-2.2455	0.72

T-N: $\ln(L) = a + b\ln Q + c\ln Q^2 + d\sin(2\pi T) + e\cos(2\pi T) + fT + gT^2$
 T-P: $\ln(L) = a + b\ln Q + c\ln Q^2 + d\sin(2\pi \text{dtime}) + e\cos(2\pi \text{dtime}) + f\text{dtime} + g\text{dtime}^2$

있을 것으로 판단된다. 그러나 T-P의 경우 R² 값이 0.72로 다소 낮게 나왔다. 이는 점오염원과 같은 오염부하 유입으로 인해 모델이 유량과 농도와의 관계를 잘 설명할 수 없는 것으로 판단된다. 본 연구에서 월곡리 유역의 오염부하 산정을 위해 LOADEST 모형의 Calibration file의 이상치를 확인한 후 AMLE를 이용하여 매개변수와 Ln(L)값을 결정하고, 11가지 식 중 가장 낮은 잔차를 나타내고 있는 식을 선택하였다. LOADEST 모형을 이용하여 T-N과 T-P의 부하량을 위해서 결정된 오염부하량 식은 식 (3)과 (4)와 같고, AMLE의 식은 식 (5) 그리고 매개변수는 Table 7과 같다.

$$T-N: \ln(L) = a + b\ln Q + c\ln Q^2 + d\sin(2\pi T) + e\cos(2\pi T) + fT + gT^2 \quad (3)$$

$$T-P: \ln(L) = a + b\ln Q + c\ln Q^2 + d\sin(2\pi \text{dtime}) + e\cos(2\pi \text{dtime}) + f\text{dtime} + g\text{dtime}^2 \quad (4)$$

여기서, L은 오염부하(kg/d), Q는 유량(ft³/s), T는 캘리브레이션 기간 동안 시작부터 10진법의 기간; a, b, c, d, e, f 그리고 g는 회귀매개변수이다.

$$L_{AMLE} = \exp\left(a_0 + \sum_{j=1}^M a_j X_j\right) H(a, b, s^2, \alpha, \kappa) \quad (5)$$

여기서 L_{AMLE}는 오염부하, a₀와 a_j는 첫 번째 편증된 값을 위해 수정된 변수, s²는 잔차 그리고 [H(a, b, s², α, κ)]는 편증된 값을 수정하기 위한 인자들이다.

LOADEST 모형을 이용하여 산정한 월별오염부하와 연간오염부하는 Table 6과 같이 나타났다. 이 중 7월의 T-N과 T-P의 오염부하는 연 오염부하의 38.8%와 39.6%로 나타났다.

3.3. NI, ESTIMATOR모형 그리고 LOADEST모형의 오염부하 비교

LOADEST 모형을 이용하여 연 오염부하를 산정한 결과 T-N은 71.94 kg/ha, T-P는 1.504 kg/ha로 나타났으며, 이는 NI 방법으로 오염부하를 산정한 T-N 147.88 kg/ha와 T-P 3.876 kg/ha에 비해 각각 0.49배와 0.39배에 해당하는 값이다. 이는 NI 방법에 사용된 실측 농도와 유량자료가 강우에 따른 유출시작 시점에 수질 채취를 하지 않은 경우 강우가 지속되는 기간의 고농도 수질이 강우시 분석된 고농도의 수질이 비강우시에도 영향을 미치어 오염부하가 낮아졌음에도 불구하고 너무 과하게 산정되었기 때문에 판단된다(Fig. 5, 6). 또한 ESTIMATOR 모형으로 산정된 T-N과 T-P의 연 오염부하는 104.2 kg/ha와 T-P 3.252 kg/ha로 NI 방법보다 0.70배와 0.84배 작게 산정되었다. T-N과 T-P의 실측 자료와 ESTIMATOR 모형으로 산정자료와의 비교결과 R²가 0.91과 0.71로 LOADEST 모형으로 산정된 결정계수보다 조금 낮게 나타났다. 따라서 LOADEST 모형을 이용하여 월곡리 유역의 오염부하를 산정하는데 적용이 가능할 것으로 판단된다.

오염부하 산정 방법에 따라 산정된 T-N과 T-P의 일별 오염부하를 Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 비교해 본 결과 NI 방법의 경우 ESTIMATOR 모형과 LOADEST 모형의 예측

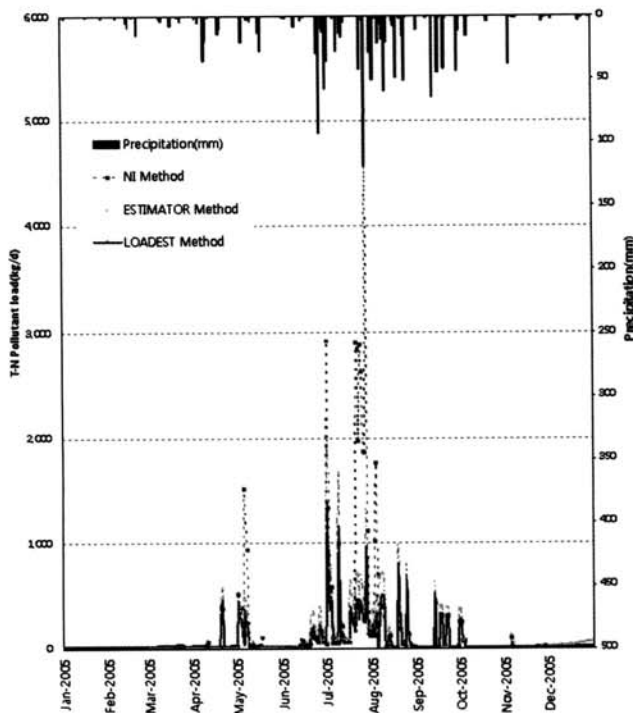


Fig. 7. T-N Pollutant loads estimated with NI, ESTIMATOR, and LOADEST.

오염부하량과 비교할 때 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히 강우시 수 배 차이가 나는 것으로 나타났는데, 이는 앞에서 언급하였듯이 NI 방법에서 강우사상당 수질 샘플을 충분히 채취하여 분석하지 않을 경우 고농도의 수질농도가 강우발생전 비강우시까지 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 LOADEST 모델에서 유역의 모니터링을 통한 실측유량 및 수질자료를 이용하여 오염부하 특성을 분석하였다. 또한 유역에서의 LOADEST 모델의 적용성을 평가하기 위해 ESTIMATOR 모델, NI 방법과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 우리나라 여름철의 특징이 잘 나타난 연구기간 동안, 월곡리 유역의 실측된 T-N과 T-P 농도는 1.54~39.84 mg/L 와 0.001~2.457 mg/L의 범위를 보였고, 유량과 농도를 이용한 연평균 유량 가중 평균농도는 T-N 11.51 mg/L와 T-P 0.31 mg/L를 나타냈다. 이 중 7월의 유량 가중 평균 농도는 연구유역의 논과 밭 등의 비점오염원이 하천으로 유입되어, 농도가 매우 높아진 것으로 판단된다.
- 2) NI 방법으로 오염부하를 산정한 결과 7월에 산정된 T-N과 T-P의 오염부하는 연 오염부하의 62.8%와 66.9%로 매우 높게 산정되었다. 이는 강우시작 및 침투 강우 종료 후 강우사상당 많은 수의 수질 샘플이 분석되었을 경우 유역에서의 오염부하 특성을 정확히 산정할 수 있으나, 충분한 수의 수질 샘플을 채취하지 못했을 경우 강우시 수질시료를 채취하였을 때의 농도가 수질시료

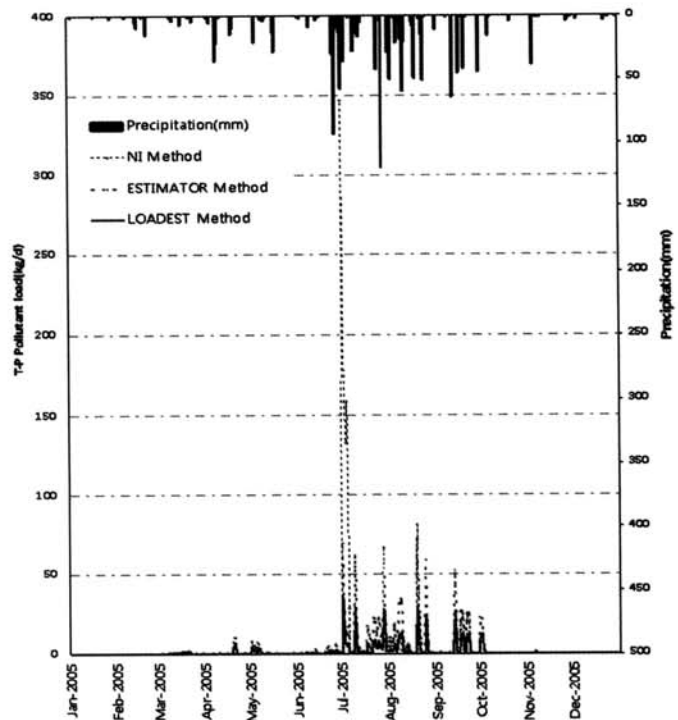


Fig. 8. T-P pollutant loads estimated with NI, ESTIMATOR, and LOADEST.

채취되지 않은 비강우시에도 영향을 주고, 농도의 변화를 유동성 있게 반영하여 오염부하를 산정하지 못하는 단점이 있다. 따라서 NI 방법을 이용하여 정확한 오염부하를 산정하기 위해서는 강우에 따른 유출시작, 침투 유출, 직접유출 종료후 강우사상당 수개의 수질 채취를 통해 오염원의 농도변화를 고려하여 오염부하를 산정해야 한다.

- 3) 실측자료와 LOADEST 모델에 의해 산정된 예측치와의 비교결과 T-N의 R² 값은 0.92로 높게 나와 향후 LOADEST 모델을 이용하여 월곡리 유역의 유출량만으로 T-N 오염부하량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 T-P의 경우 R² 값이 0.72로 다소 낮게 나왔다. 따라서 T-P에 대한 오염부하 산정식의 경우 어느 정도 불확실성을 내포하고 있다.
- 4) NI 방법과 ESTIMATOR 모델의 단점을 보완하여 LOADEST 모델은 계절적인 영향을 고려하고 모델에 필요한 결정계수를 산정한다. 또한 11가지 회귀식 중 실측 유량과 농도와의 상관관계를 통해 선택된 회귀식을 자동으로 선택하여 실측되지 않은 기간 동안의 농도를 산정한다. 따라서 LOADEST 모형은 NI 방법과 ESTIMATOR 모델의 단점을 보완하여 월곡리 유역과 같은 농촌 소유역에서의 오염부하를 산정하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2005년도 한강수계관리위원회에서 시행한 환경기초조사사업 연구결과 및 2008년도 한강수계관리위원회

에서 시행한 환경기초조사사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 노상덕, 김장현, 이대근, 김선주, 손병용, 전양근, 황성호 (2006). 유역의 비강우시 및 강우시 오염물질 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(4), pp. 695-705.
- 신민환, 신용철, 허성구, 임경재, 최중대(2007). 농업 및 산림유역의 강우유출수 유량가중평균농도 분석. *한국농공학회지*, **49**(6), pp. 3-9.
- 최중대, 이찬만, 최예환(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, **32**(4), pp. 501-510.
- 환경부(1996). *환경부제정 수질공정시험법*.
- 환경부(2006). *물환경관리 기본계획*.
- 환경부(2008). *수질오염총량관리제. 고시·훈령·규정집*.
- Cohn, T. A., DeLong, L. L., Gilroy, E. J., Hirsh, R. M., and Wells, D. K. (1989). Estimating constituent loads. *Water Resources Research*, **25**(5), pp. 937-942.
- Cohn, T. A., Calder, D. L., Gilroy, E. J., Zynjuk, L. D., and Summers, R. M. (1992a). The validity of a simple log-linear model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. *Water Resources Research*, **28**(9), pp. 2353-2363.
- Cohn, T. A., Gilroy, E. J., and Baier, W. G. (1992b). Estimating fluvial transport of trace constituents using a regression model with data subject to censoring. *Proceedings of the Joint Statistical Meeting*, Boston, pp. 142-151.
- Cohn, T. A. (2005). Estimating Contaminant Loads in Rivers : An Application of Adjusted Maximum Likelihood to Type I Censored Data. *Water Resources Research*, **41**(8), pp. 13.
- Donato, M. M. and MacCoy, D. E. (2005). Scientific Investigations Report Phosphorus and Suspended Sediment Load Estimates for the Lower Boise River, Idaho, 1994-2002. Scientific U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Gilroy, E. J., Hirsch, R. M. H., and Cohn, T. A. (1990). Mean Square Error of Regression-Based Constituent Transport Estimates. *Water Resources Research*, **26**(9), pp. 2069-2077.
- Haggard, B. E., Soerens, T. S., Green, W. R., and Richards, R. P. (2003). Using regression methods to estimate stream phosphorous loads at the Illinois river. *American Society of Agricultural Engineers*, **19**(2), pp. 187-194.
- Roman-Mas, A., Stogner, R. W., Doyle, U. H., and Klaine, S. J. (1994). Assessment of agricultural non-point source pollution and Best Management Practices for the Beaver Creek watershed, west Tennessee. In G. L. Pederson (ed.) *Proceedings, American Water Resources Association National Symposium on Water Quality*, Nashville, TN, April 17-20, 1994. *American Water Resources Association*, Bethesda, MD.
- Runkel, R. L., Crawford, C. G., and Cohn, T. A. (2004). Load estimator (LOADEST): A FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers: *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, Book 4, Chapter A5, pp. 69.
- Shin, Y. C., Heo, S. G., Lim, K. J., and Choi, J. D. (2005a). Analysis of Pollutant load Characteristics from Small Agricultural Watershed using ESTIMATOR Model. *Journal of Environmental Research* (Kangwon Univ.), **2**, pp. 37-41.
- Shin, Y. C., Heo, S. G., Lim, K. J., and Choi, J. D. (2005b). Evaluation of Applicability of the ESTIMATOR Model for the Analysis of Nutrient Load Characteristics. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **47**(7), pp. 67-75.