

효과적인 하천 오염부하량 산정 위한 NI 방법 및 ESTIMATOR, LOADEST 모형 적용 및 평가

장원석, 류지철, 강현우, 이지원, 김기성, 임경재*
강원대학교 지역건설공학과

Application and Evaluation of the NI, ESTIMATOR, LOADEST to Estimate Efficiently Pollutant Loadings from a Stream

Jang, W. S., J. Ryu, H. Kang, J. Lee, K. Kim and K. J. Lim*

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Abstract

It is required to estimate Nonpoint Source (NPS) pollutant loadings and to evaluate emission characteristics of NPS in order to protect and manage eutrophication in a stream. Thus, the purpose of this study is to 1) calculate total pollutant loadings and pollutant loadings by baseflow from the stream using Numeric Intergration (NI), ESTIMATOR, and LOADEST, and to 2) give a guideline regarding the most appropriate model for estimating pollutant loadings through the comparison of NI, ESTIMATOR, and LOADEST. As a result of this study, of total pollutant loadings from the stream, pollutant loadings by baseflow ranges from 54 to 85 %. Therefore, because the result of this study shows that pollutant loadings by baseflow are bigger than that by streamflow, it is very necessary for the efficient management of pollutant loadings by baseflow.

Key words: baseflow, ESTIMATOR, LOADEST, NI, NPS.

서론

최근 급격한 도시화 및 산업발달과 생활수준향상으로 인하여 도시지역의 오염물질 배출량이 증가하고 있고 (Uhm et al., 2006) 농촌지역에서는 농작물의 많은 생산성 증대를 위한 비료사용과(Choi et al., 2007) 축산농가의 기업화로 인한 하천의 부영양화가 심각하게 진행되고 있다(Jeong, 2006). 이러한 하천의 부영양화로 인하여 국지적으로는 수자원의 가치를 상실한 하천이 나타나고 있고 (Kim et al., 2006), 농촌지역에서는 취수의 주 수원인 소하천과 저수지 수질이 전반적으로 급속히 저하되어 가는 경향을 보이고 있어 이로 인한 농작물의 피해가 예상되고 있다(Kim and Kwun, 1993).

농업유역에서의 발생하는 오염부하는 점오염원과 비점오염원에 의한 오염부하로 구분되는데, 비점오염원은 점

오염원과 달리 오염물의 종류, 발생량 및 생물에 미치는 영향에 따른 기작을 간단하고 명료하게 나타내는 것이 어렵고(Kwun, 1998), 주로 토지 이용행위로 인해 발생되기 때문에(Ichiki et al., 1999) 하천의 부영양화 및 수질 악화를 미리 방지하고 관리하기 위해서는 이러한 비점오염원의 오염부하 산정 및 배출 특성을 분석하는 것이 중요하다(Kim, 2007). 비점오염원의 오염부하는 다시 지표유출과 기저유출에 의한 오염부하로 나눌 수 있으며, 기저유출에 의한 오염부하가 전체 오염부하의 50% 이상 차지할 수 있기 때문에 비점오염원의 의한 오염부하 산정 시 지표유출 뿐만 아니라 기저유출에 의한 오염부하 산정도 반드시 함께 이루어져야 한다.

따라서 최근 이러한 비점오염원 관리를 위하여 오염총량관리제가 우리나라에서 시행되고 있으며 비점오염원의 오염물질 유입 및 대상유역에서 발생하는 오염부하량

*Corresponding Author: Lim, K. J. (E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr)

산정을 하기 위한 보다 합리적이고 정확한 수질모형의 적용이 중요한 문제로 대두되고 있다(Park, 2008).

따라서 본 연구의 목적은 하천 오염부하량 산정 모형 중 1. NI, ESTIMATOR, LOADEST 모형을 이용하여 전체 하천 오염부하량 및 기저유출에 의한 하천 오염부하량을 산정하고, 2. 세 가지 방법에 따른 하천 전체 및 기저유출 오염부하량을 비교하여 하천 오염부하량 산정에 있어 보다 합리적이고 적합한 모형을 제시하는데 있다.

재료 및 방법

1. NI, ESTIMATOR, LOADEST

가. Numeric Integration (NI) 방법

오염부하량을 산정하기 위한 간단한 방법인 NI 방법은 식 (1)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

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

여기에서 c_i 는 i 번째 샘플의 농도이고 q_i 는 i 번째 유량이다. 그리고 t_i 는 i 번째 샘플로서 표현되는 시간 구간으로 $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 이다. 여기에서 t_i 는 반드시 모든 샘플별로 똑같은 필요는 없다. NI 방법은 유량이 고유량일 경우 충분한 샘플이 측정되고 저유량일 경우에도 어느 정도 샘플이 측정되어야 정확한 오염부하량을 산정할 수 있다. 이 방법은 일단 유량이 가변적이고 농도가 유량 증가 모두 함께 증가한다는 가정 하에서 이루어진다. 이 방법은 고유량 시 농도가 저유량 시

농도보다 클 때, 그리고 적어도 연 부하량의 70% 정도가 고유량에서 발생할 때 추천할 만한 방법이다.

NI 방법을 이용하여 오염부하 산정 시 각 구간별 대표농도는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 해당 실측 샘플링 이전 및 이후 기간 사이의 대표농도로 그 해당 실측 농도가 이용되어 오염부하량이 산정된다. 이 방법은 강우에 따른 유출시작, 침투 유량 발생 및 직접유출 종료 후 강우 사상별 충분한 수의 수질 샘플이 분석 되었을 경우 오염 부하 특성과 양을 정확히 산정할 수 있다. 그러나, 수질 샘플 수가 부족할 경우, 그리고 강우시 수질시료 농도가 비강우시 수질농도에 영향을 줄 수 있기 때문에, 수질 변화의 경향과 오염물질의 양을 정확히 파악하기 힘들다는 단점이 있다. 또한 1주일, 혹은 그 이상의 간격을 두고 샘플을 채취한 경우 이전 강우 사상의 농도가 비강우시의 농도에도 영향을 미치게 되어 일별, 월별, 그리고 연간 오염부하의 값이 실제 오염부하량 보다 작게, 혹은 크게 산정 될 수도 있다. 따라서 NI 방법을 이용하여 정확한 오염부하를 산정하기 위해서는 강우사상에 의한 유출의 시작, 침투 유량 발생 및 직접유출 종료 후 충분한 수의 수질 샘플링을 통해 오염원의 농도를 유동적으로 고려하여 정확한 오염부하를 산정해야 한다.

Fig. 1은 임의의 지점에서의 가상적인 유량의 변화와 실측 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 4개의 수질 샘플을 이용하여 전체 유량측정 기간 동안의 오염부하량을 NI 방법을 이용하여 산정할 경우, 전체 유량 측정 구간을 샘플이 채취된 시점을 기준으로 분리해야 한다.

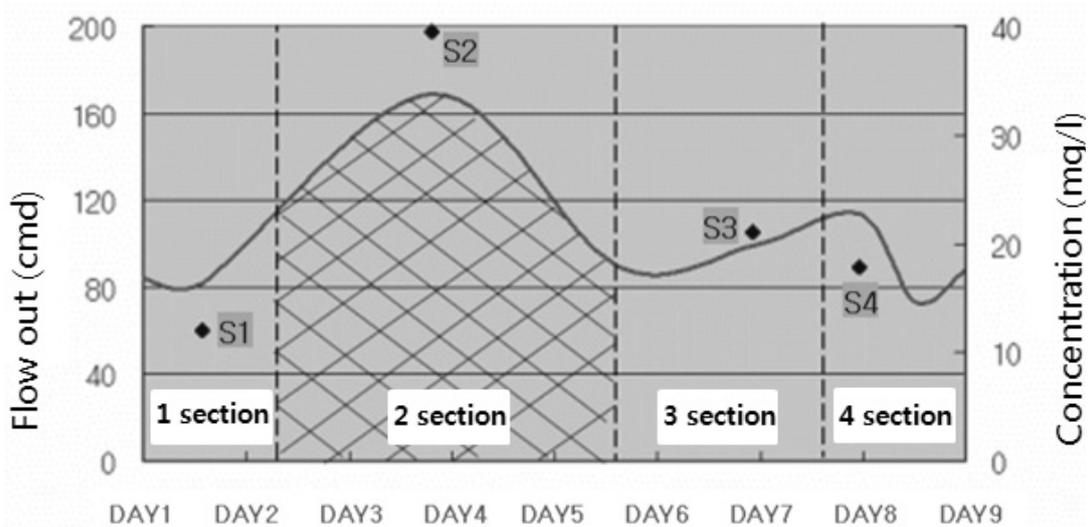


Fig. 1. Estimation of pollutant loadings using the NI method.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 유량이 증가하는 “2 구간”에서의 수질샘플농도를 이용하여 2구간의 오염부하량을 산정할 경우 “S2” 샘플의 농도를 2구간 전체의 대표농도로 가정하여 오염부하량을 산정해야 한다. 그러나 충분한 수질 채취가 이루어지지 않을 경우 “S2” 샘플의 농도를 “2 구간” (약 3일)의 대표농도로 가정하기에는 여러 가지 문제가 있어 전체 오염부하량이 실제보다 과도하게 산정될 수 있는 단점이 있다. 또한 침두유량시 수질 채취를 하지 못할 경우 실제 오염부하량보다 적게 산정되는 경우도 있다. 많은 연구에 의하면 강우 사상당 적어도 12개 이상의 수질 샘플을 채취해야 정확한 오염부하량을 산정할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 대부분의 경우 여러 가지 제약으로 인하여 강우 사상당 12개의 수질 샘플을 채취하는 것은 거의 불가능하다.

나. ESTIMATOR 모형을 이용한 오염부하량 산정 방법

ESTIMATOR는 미국 국립지리국(USGS)에서 개발한 오염부하량 산정 모형으로 연구기간 동안 분석된 실측 유량자료와 수질자료를 이용하여 오염부하를 산정한다. ESTIMATOR 모형은 일 유량자료와 실측 수질 수질농도와의 관계를 이용하여 7 parameter 회귀식을 산정하며, 이를 이용하여 수질 샘플이 채취되지 않은 기간 동안의 수질농도를 추정한다. 또한 유량과 농도 그리고 시간의 관계를 이용하여 연구유역 하천의 수질농도의 계절적인 특성을 반영한다.

ESTIMATOR 모형의 오염부하량 산정을 위해 사용된 7 parameter 회귀식은 식 (2)와 같다.

$$\ln [C] = \beta_0 + \beta_1 \ln \left(\frac{Q}{\tilde{Q}} \right) + \beta_2 \ln \left(\frac{Q}{\tilde{Q}} \right)^2 + \beta_3 \ln [T - \tilde{T}] + \beta_4 \ln [T - \tilde{T}]^2 + \beta_5 \sin [2\pi T] + \beta_6 \cos [2\pi T] + \epsilon s \tag{2}$$

C: 수질항목의 농도, Q: 일유량, T: 연구기간, $\beta_0 \sim \beta_6$: 회귀식의 계수, \tilde{Q} 와 \tilde{T} : 중앙값, ϵ : 변환오차

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.

다. LOADEST 모형을 이용한 오염부하량 산정 방법

LOADEST 모델은 유량과 시간에 따라 변화하는 하천의 오염부하를 산정하기 위해 개발된 회귀식 기반 오염부하 산정 프로그램이다. 이 LOADEST 모델은 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 모형의 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 모델을 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, 보다 정확해 줄 그대로 사용했을 경우는 MLE 방법이 사용된다. 또한 LAD 방법은 잔차가 정규분포를 따를 때 사용된다. Estimation file은 선정된 최종 모형을 활용하여 일별, 월별, 그리고 연 오염부하량을 산정하는데 이용된다. Header file은 LOADEST 모델을 실행하는데 필요한 입력 정보를 담고 있다. 그리고 계절적 영향을 고려하기 위해 기간을 설정하고 결과물의 오염부하와 농도의 단위를 결정하는데 Header file이 사용된다. Header file에서는 우리나라 강우 특성에 맞게 7~9월의 계절적인 영향을 고려하였으며, 모형에 사용된 11가지 회귀식 중 오류가 가장 작은 회귀식이 최종 선정된다. LOADEST 모형에 사용되는 11가지 식은 Table 1과 같다.

Table 1. Regression equations of the LOADEST model

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	$a_0 + a_1 \text{per} + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q \text{per} + a_4 \ln Q^2 + a_5 \ln Q^2 \text{per}$

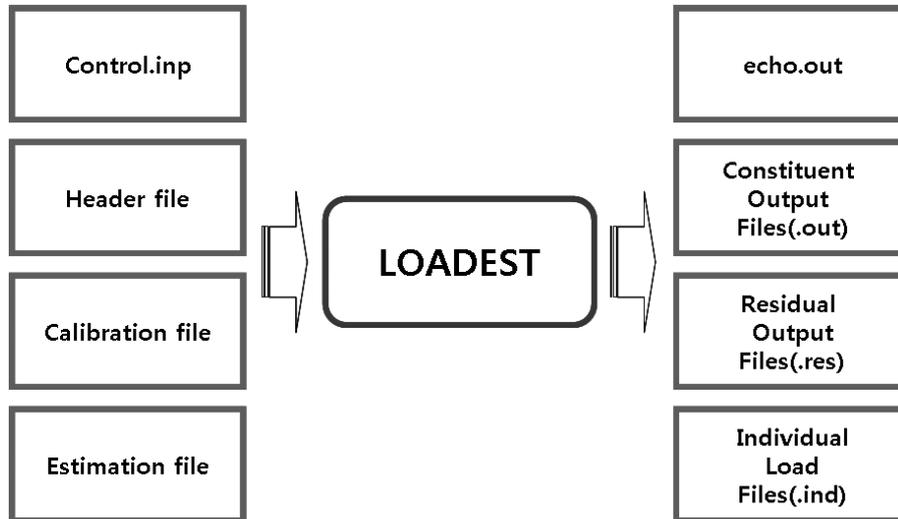


Fig. 2. Input and output data of the LOADEST model.

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

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 회귀식을 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 보여준다.

2. 건기시 하천 오염부하량 산정 기법

하천변 지표면 및 지하수층에서 기원한 오염물질은 지표유출, 기저유출에 의해 하천으로 유입된다. 우리나라 기후특성 상 여름철 풍수기에는 지표유출 및 측면유출에 의한 오염물질 유입이 많지만, 갈수기(건기시)에는 대부분의 오염물질이 기저유출을 통해 발생한다 (Hallberg, 1987). 기저유출에 의한 유입은 넓은 면적을 따라 1년 내내 유입되어 하천의 기본 수질에 지속적인 영향을 미치게 된다. 따라서 유럽, 캐나다 등의 선진국

에서는 배경수질을 조사하여 관리하거나 하천변 지하수에 대한 기준을 별도로 설정하는 등 기저유출에 의한 유입을 특성에 맞게 효율적으로 관리하기 위한 노력을 기울이고 있다 하지만 우리나라에서는 하천의 오염부하 특성에 국한된 연구가 주로 수행되어 왔으며, 기저유출에 의한 하천 오염부하 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적 중 하나는 기저유출에 의한 하천 오염부하량을 산정하는데 있다. 건기시에는 주로 기저유출 형태를 통해 오염물질이 하천으로 유입되며 (Hallberg, 1987) 이를 위해 유역에서 측정된 유량 및 수질 농도 자료를 3가지 오염부하량 산정하는 방법(NI 방법, ESTIMATOR 모형, LOADEST 모형)을 이용하여 건기시 유역에서 기저유출 형태로 유입되는 오염부하를 산정 하였다.

기저유출에 의한 하천 오염부하량을 산정하기 위해서는 첫째, 비강우시 측정된 수질농도 자료를 분리해야 한다. 따라서 본 연구에서는 강우가 10mm 이하일 때를 건기시(갈수기)라고 간주하였고(Jeong, 2002), 이에 준하여 수질농도 자료를 분리하였다.

둘째, 건기시, 하천 오염부하량은 대부분 기저에 의해 유출되기 때문에(Hallberg, 1987) 하천의 유량자료를 직접유출 및 기저유출로 분리해야 한다. 하천 유량자료로부터 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법에는 많은 방법이 있다. 그동안 많이 이용되어 오던 그래픽 방법의 주관적인 면을 배제하기 위하여 USGS (US Geological Survey) HYSEP (Sloto et al., 1996) 같은 기저유출 분리 프로그램에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 DOS 기반의 HYSEP은 프로그램에 데이터를 입력하고 실행하는데 많은 어려움이 있다. 그리하여 Eckhardt (2005)는 유역내 대수층 특성을 고려하여 기저유출을 분리하는 모듈을 제안 하였다. Eckhardt 필터를 이용하여, 기저유출 분리시 이용되는 BFI_{max} (BaseFlowIndex_{max})값 선정에 있어 주관적인 요소를 최소화 하기 위해 Eckhardt (2005)는 대표적 대수층 별로 BFI_{max} 대표값을 제안하였다. 이러한 BFLOW 및 Eckhardt 필터를 이용하여 손쉽게 기저유출을 분리해 내기 위해 Lim et al.(2005)에 의해 개발된 시스템이 Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool(WHAT) 이다. WHAT Web GIS 시스템은 웹브라우저만을 이용하여 손쉽게 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있는 시스템이고, 사용자가 입력 자료를 직접 준비할 필요 없이 미국 국립지리국의 유량 자료를 실시간으로 질의하여 수문분석을 수행하는 사용자 중심 시스템이다. 또한 전세계 사용자를 위하여 유량자료를 직접 입력하거나

WHAT Web GIS 서버로 업로드를 할 수 있는 모듈을 제공하고 있기 때문에 본 연구에서는 WHAT system을 사용하여 하천 유량을 직접유출과 기저유출로 분리하였다. 또한 본 연구에서는 건기시(갈수기)를 강수량이 10mm 이하인 기간이라고 간주하였는데(Jeong, 2002) WHAT system 특성상 이를 고려하지 못하기 때문에 위의 WHAT system에서 산정된 직접 유출 및 기저유출을 다시 강수량이 10mm 이하인 날짜의 경우, 직접유출은 발생하지 않고 WHAT에서 산정된 직접유출이 모두 기저유출로 발생한다고 재산정 하였다.

셋째, 이렇게 비강우시(강우 10mm이하) 분리된 수질농도 자료와 WHAT system에서 직접/기저유출을 분리 후 10mm이하의 강우가 온 기간에 대해 다시 계산된 하천의 기저유출 자료를 NI, ESTIMATOR, LOADEST 모형을 이용하여, 기저유출에 의한 하천 오염부하량을 산정하였다.

결과 및 고찰

1. 하천 오염부하량 산정

본 연구에서는 하천에서의 오염부하량을 산정하는데 널리 활용되는 NI 방법, ESTIMATOR 모형, LOADEST 모형을 이용하여 오염부하량을 산정하였다. 황계2리 유역의 유량 자료는 집중호우로 인한 실측 자료의 결손으로 인하여 2006년 1월 1일부터 2006년 12월 31일 까지 해당 유역의 예측 일별 유량 자료를 이용하였다. SWAT 수문 컴포넌트는 도담댐 유역에 대해 이미 검토·보정 되었기 때문에 (결정계수 0.76, EI 지수 0.65 (보정), 결정계수 0.92, EI 지수 0.83 (보정)), 유역의 유량 변동 특성을 잘 반영한다고 판단하여 본 연구에서 오염부하 산정의 입력자료로 이용되었다. NO_3-N 농도는 2006년에 작물 재배가 집중되는 시기에만 측정되었기 때문에 이 기간동안의 일 수질 농도를 이용하였으며 나머지 일별 농도는 SWAT 예측농도를 이용하였다.

모형의 특성상 NI방법에 사용된 유량 단위는 CMS이고, ESTIMATOR와 LOADEST 모형에 적용된 유량의 단위는 CFS로 기존의 유량자료를 변환하여 입력하였다. 수질 자료로 사용된 NO_3-N 농도의 단위는 모두 동일하게 mg/l 이며, 일 오염부하의 단위는 kg/day이다. 아래 Fig. 3은 3가지 방법에 의해 산정된 2006년 1년 동안의 오염부하량을 나타내는 그림이며, 이 그림에서 연 최대 오염부하량에는 다소 차이가 있으나, 전체적인 경향이 상당히 유사함을 확인 할 수 있다. Fig. 4는 3가지 방법에 의한 연간 총 오염부하량을 나타내는 그래프이다. 3

가지 방법으로 계산된 연 총 오염부하량은 NI 방법 33,084kg/yr, ESTIMATOR 모형으로 산정된 부하량은 50,439kg/yr, LOADEST 모형으로 산정된 부하량은 25,925kg/yr 로 각각 산정되었다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 ESTIMATOR 모형의 경우 오염부하량을 크게 산정하는 것으로 나타났다. 이는 ESTIMATOR 모형의

경우 LOADEST모형과는 달리 유량과 농도를 설명하는 회귀식이 한가지로 정해져있기 때문이다. 따라서 유량과 농도의 변화 특성을 잘 설명할 수 있는 다양한 회귀모형을 가진 LOADEST 모형이 오염부하 특성을 설명하는데 더 적합하리라 판단된다.

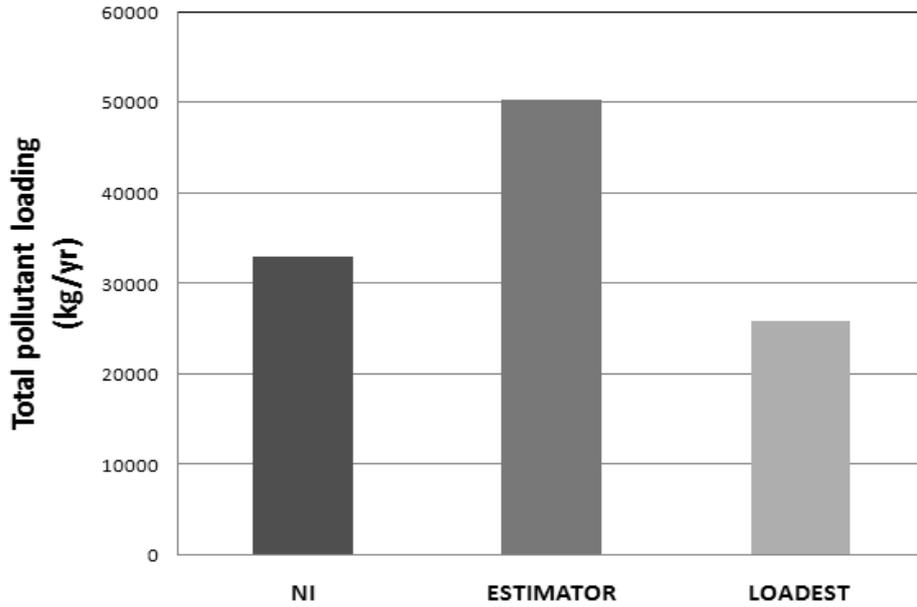


Fig. 3. Comparison of yearly total pollutant loadings from Hoenggye-2 ri watershed.

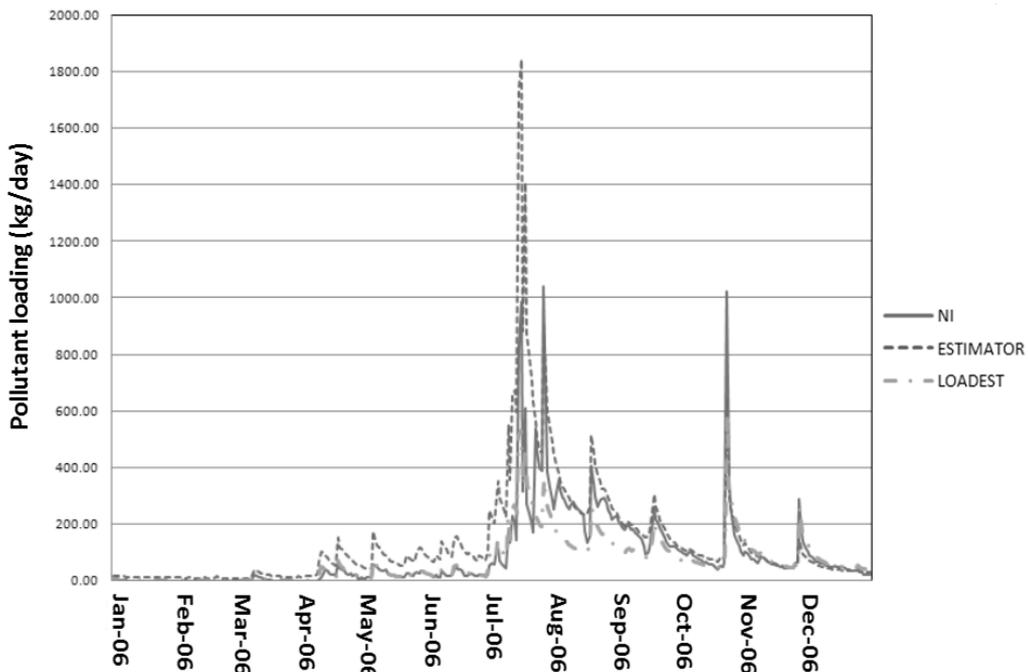


Fig. 4. Comparison of pollutant loadings from Hoenggye-2 ri watershed.

Table 2. Component ratio of pollutant loadings and agricultural fields per unitarea of each watershed

	Hoenggye-2ri	Yupo-ri	Wolgok-ri
Yearly total pollutant loadings per unit area (kg/yr/ha)	74.9	173.3	13.5
Ratio of agricultural fields (%)	2.5	20.5	14

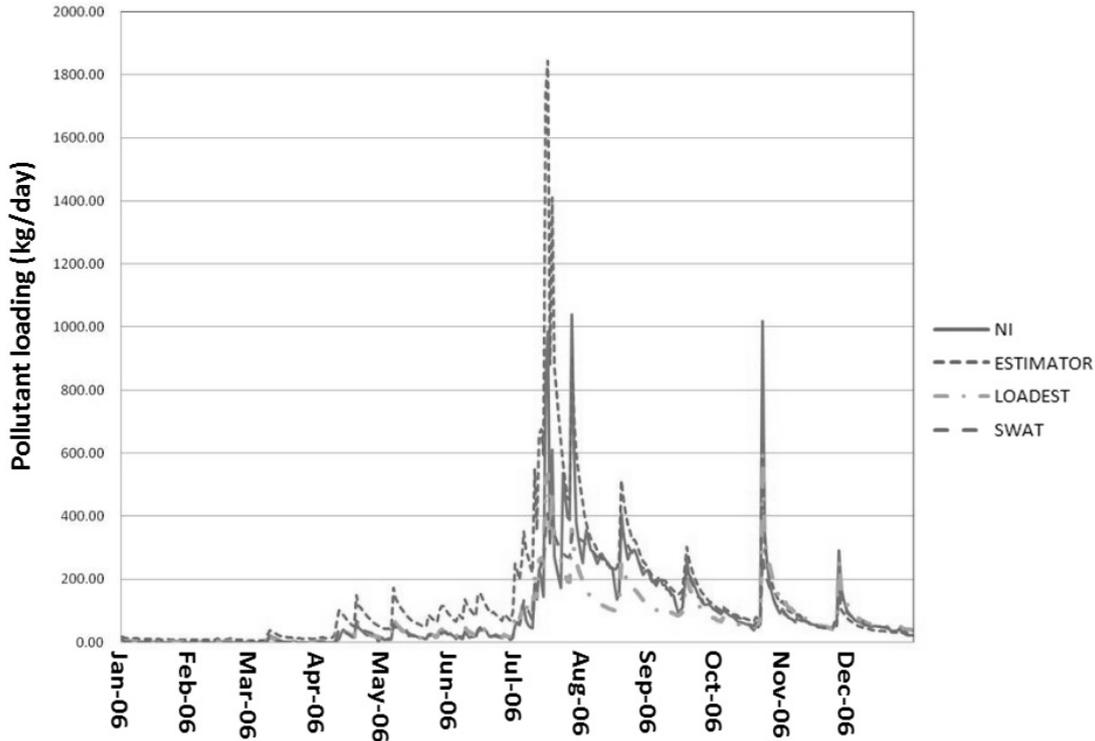


Fig. 5. Comparison of pollutant loadings from Hoenggye-2 ri watershed. Evaluation of pollutant loadings of the NI, ESTIMATOR, LOADEST, and SWAT with daily data.

본 연구에서 산정된 황계2리 유역의 NO₃-N의 연간 부하량을 다른 유역에서 측정된 오염부하량과 비교하였다. 강원도 춘천시 신북읍 유포리 유역, 강원도 춘천시 동면 월곡리 유역의 단위면적당 연간 총 오염부하량을 비교해 본 결과(Table 2), 각 유역에서 발생한 단위면적당 연간 총 NO₃-N 부하량과 유역의 농경지 비율은 어느 정도 관련이 있으며, 또한 재배작물, 영농방법, 시비량 등과 매우 밀접한 관련이 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 경작지면적에 따라 오염부하량을 산정하는 단위면적당 오염부하량 산정 방법보다는 유역내 경작지 재배 작물 및 시비량 조사를 통해서 오염부하량을 산정해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 위에 언급된 3가지 방법을 산정된 오염부하량과 본 연구에서 이용된 SWAT 모형의 예측 부하

량을 비교 분석하였다. Fig. 5는 NI방법, ESTIMATOR 모형, LOADEST 모형, 관행시비 시나리오에 따른 SWAT 모형 일별 오염부하량을 나타낸다. 최대 오염부하량이나 총 오염부하량에는 다소 차이가 있으나, 전체적인 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 2006년의 총 부하량은 NI방법의 경우 33,084.2 kg, ESTIMATOR 모형은 50,439.2 kg, LOADEST 모형은 25,925.3 kg, SWAT 모형의 예측치는 30,080.5 kg 이다. 관행시비 시나리오에 따른 SWAT 예측치는 NI방법과 LOADEST 모형으로 산정한 오염부하량과 비슷한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 경작기간 동안(4개월) 일단위로 측정된 NO₃-N 농도 자료를 이용하여 오염부하량을 산정하였다. 그러나 일반적인 경우 일단위로 수질농도를 측정하는 것은 여러 가지 경제적인 면을 고려하며 볼 때 불가

능할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1주일에 한 번 정도 수질 농도를 측정하였다고 가정하여 NI 방법, ESTIAMTOR 모형, LOADEST 모형으로 오염부하를 산정하였으며, 이를 SWAT 예측 부하량과 비교하였다. Table 3에서 확인 할 수 있듯이 일별 샘플링의 경우 NI 방법이 가장 유사한 총 오염부하량 결과를 보이나, 주별 샘플링의 경우 LOADEST 모형이 가장 유사한 총 오염부하량이 산정 되었다. 이는 환경부에서 측정하는 8 일 간격의 수질자료를 이용하여 유역의 오염부하를 산정할 경우, LOADEST 모형이 매우 유용하게 활용될 수 있음을 의미한다. Fig. 6은 주별 샘플링을 실시하였을 경우 4가지 방법에 의한 오염부하량의 비교 그래프이다. Table 3과 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 SWAT 예측치와 LOADEST 모형 산정 부하량과 비슷하였다. 따라서 수질 샘플링 빈도가 높지 않을 경우 유량과 수질과의 관계를 잘 설명해 줄 수 있는 LOADEST와 같은

모형을 이용하여 오염부하를 산정하는 것도 정확한 오염부하 산정 방법이 될 수 있을 것이라고 판단된다.

2. 기저유출에 의한 하천 오염부하량 산정

본 연구에서는 황계2리 유역의 건기시 기저유출 형태로 유입되는 오염부하를 산정 하였다. 이를 위해 하천 유량을 WHAT system을 통해 직접유출과 기저유출로 분리하였으며, 10mm 이하의 강우에 대해서는 모두 기저유출 형태로 하천으로 유입이 된다고 가정하였다. 이와 같이 하천 유량을 직접 및 기저유출로 분리한 후 위에서와 마찬가지로 하천 오염부하량을 산정하기 위해 적용하였던 NI, ESTIMATOR, LOADEST 모형을 적용하였고, 황계 2리의 일별 유량 자료 및 수질 농도 자료 또한 위의 전체 하천 오염부하량 산정 시 이용했던 자료를 사용하였다.

Table 3. Yearly NO₃-N loadings according to each method of calculating pollutant loadings at sampling intervals

	NI	ESTIMATOR	LOADEST	SWAT
Daily sampling	33,084.2	50,439.2	25,925.3	30,080.5
Weekly sampling	34,481.9	66,315.8	31,357.4	30,080.5

(kg/yr)

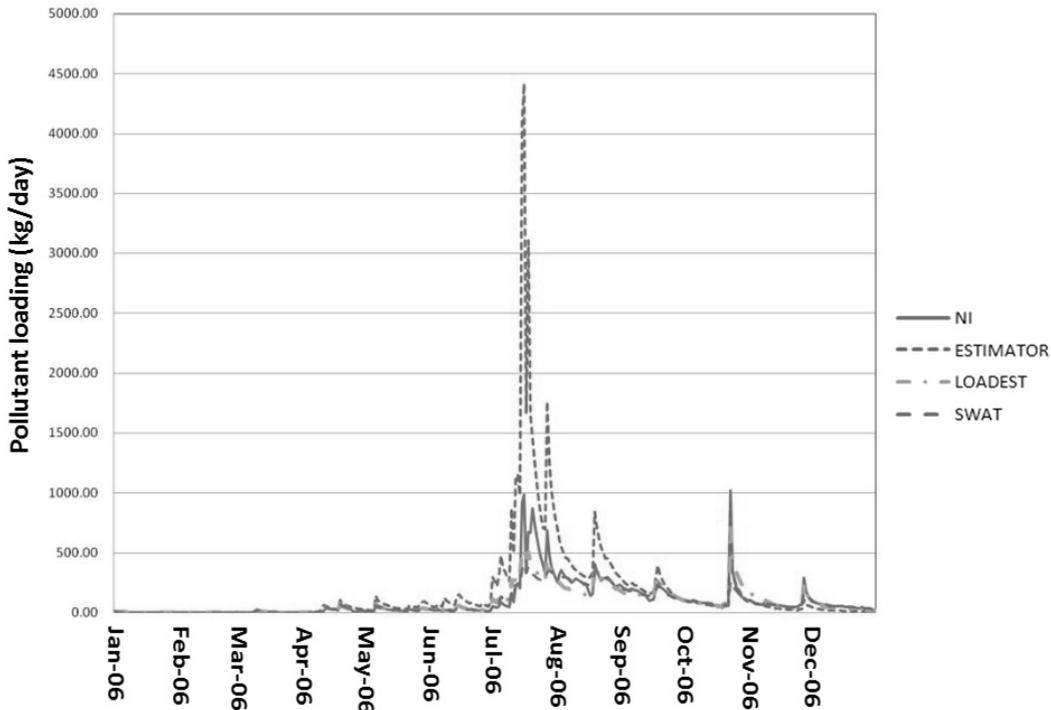


Fig. 6. Comparison of pollutant loadings from Hoenggye-2 ri watershed. Evaluation of pollutant loadings of the NI, ESTIMATOR, LOADEST, and SWAT with weekly data.

아래 Fig. 7은 3가지 방법에 의해 산정된 2006년 1년 동안의 기저유출에 의한 오염부하량을 나타내는 그림이다. 2006년 1년 동안의 황계2리 유역에 건기시 총 하천 오염부하량은 분석 방법에 따라, 22,773.9 kg/yr(NI 방법), 27,478.8 kg/yr(ESTIMATOR모형), 22,261.7 kg/yr(LOADEST모형)로 산정되었고 다른 모형에 비해 ESTIMATOR모형이 다소 높게 산정되었다. 이는

ESTIMATOR 모형의 경우 LOADEST 모형과는 달리 유량과 농도를 설명하는 회귀식이 한가지로 정해져있기 때문이다. 따라서 유량과 농도의 변화 특성을 잘 설명할 수 있는 다양한 회귀 모형을 가진 LOADEST 모형이 오염부하 특성을 설명하는데 더 적합하리라 판단되며 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 전체적인 건기시 하천 오염부하 특성을 설명하는데 더 적합하리라 판단되며

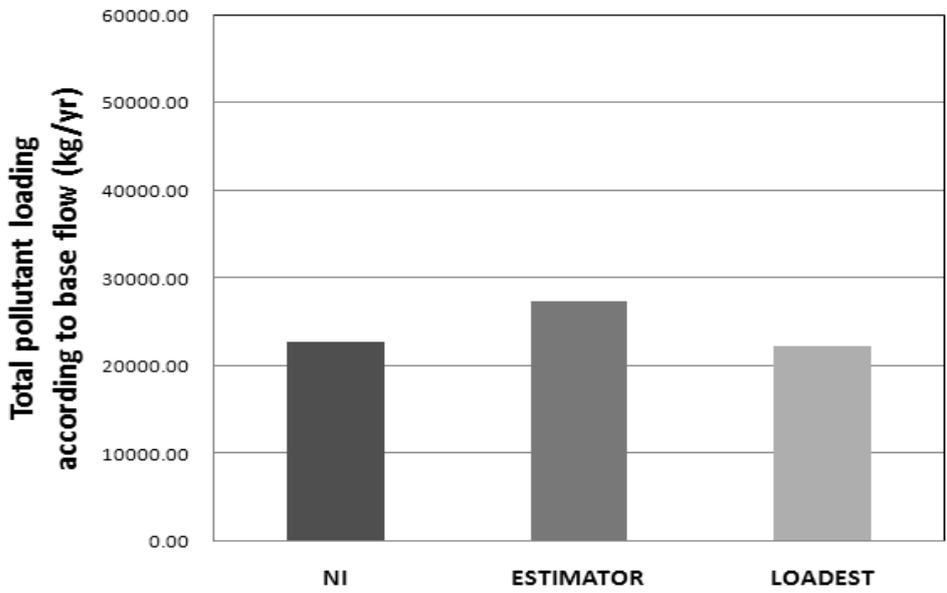


Fig. 7. Comparison of yearly total pollutant loadings from Hoenggye-2 ri watershed.

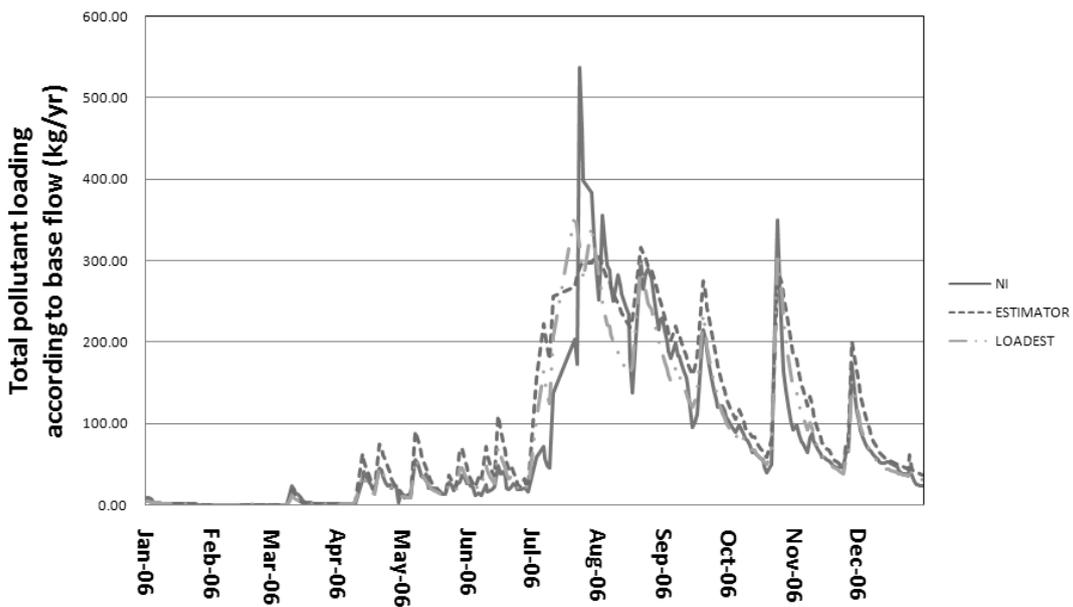


Fig. 8. Comparison of pollutant loadings from Hoenggye-2 ri watershed according to baseflow.

Fig. 8에서 보이는 바와 같이 전체적인 건기시 하천 오염부하량 경향은 비슷한 것으로 분석되었다. 황계2리에 대한 기저유출에 의한 오염부하량이 전체 하천 오염부하량에서 차지하는 비율은 NI방법(68%), ESTIMATOR 모형(54%), LOADEST 모형(85%)로 각각 모형 별로 차이가 있는 것으로 나타났다.

본 연구 결과에서 알 수 있듯이 최근에 널리 이용되는 환경부 8일 유량 자료를 이용하여 수질 샘플링 빈도가 높지 않을 시에는 LOADEST와 같은 모형을 이용하여 오염부하를 산정하는 것이 정확한 오염부하 산정 방법이 될 수 있을 것이라고 사료된다. 또한 본 연구에서 산정된 바와 같이 전체 하천 오염부하량에서 기저유출에 의한 오염부하량이 차지하는 비율이 최소 54%부터 최대 85%까지 차지할 수 있는 것으로 분석되었고, 풍수기에 의해 발생하는 직접유출에 의한 하천 오염부하량보다 기저유출에 의한 오염부하량의 비율이 더 높기 때문에 하천 오염 관리에 있어 기저유출에 의한 오염부하량에 대한 오염방지대책이 중요하다고 판단된다.

참고문헌

- Choi, Y. J., Gim, G. M., Lee, J. Y., Kang, K. H., Yun, S. G. (2009) An Analysis of Purchasing and Using Fertilizer by Farmers. *Journal of Agricultural Extension & Community Development* 16(4): 687-711.
- Eckhardt, K. (2005) How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. *Hydrological Processes* 19(2): 507-515.
- Hallberg, G. R. (1987) Nitrates in ground water in Iowa. In: D'Itri, F. M., Wolfson, L. G. (Eds.). *Rural Ground Water Contamination*. Lewis. Chelsea Michigan.
- Ichiki, A., Yamada, K. (1999) Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Japan. *Water Science and Technology* 39(12): 17-25.
- Jeong, I. H., Choi, S. C., Won, C. H., Chang, B. S., Rim, J. M. (2006) Runoff Characteristics of Nonpoint Source Pollution with Land Application of Animal Waste. 2008 Autumn Conference of the Korean Society on Water Quality & Korean Society of Water and Wastewater 959-967.
- Jeong, S. W. (2002) Total Maximum Daily Load Management System II (Technical Guidelines of Water Pollution Load Management). National Institute of Environmental Research.
- Kim, H. T., Kwun, S. K. (1993) A Study on the Characteristics of Water Pollution in Rural Areas. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 12(2): 129-143.
- Kim, J. H., Kim, C. Y., Lee, S. T., Choi, C. M., Jung, G. B., Lee, J. S., Kim, W. I. (2007) Properties of Water Quality and Land Use at the Rural Area in the Nakdong River Watershed. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 26(2): 99-106.
- Kim, S. J., Choi, Y. S., Bae, W. K. (2006) Application of Hybrid Constructed Wetland System for Stream Water Quality Improvement. *Journal of Korean Society on Water Quality* 22(2): 209-214.
- Kwun, S. K. (1998) Management Improvement and Perspective on Nonpoint Sources of Water Pollution in Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 20(11): 1497-1510.
- Lim, K. J., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J. D., Kim, K. S., Muthukrishnan, S., Tripathy, D. (2005) Automated Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool. *Journal of the American Water Resource Association* 41(6): 1407-1416.
- Park, J. D., Shin, D. S., Kim, M. S., Kong, D. S., Rhew, D. H., Jung, D. I., Na, E. H. (2008) Development of a Stream Water Quality Model (QUAL-NIER) for the Management of Total Maximum Daily Loads. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(6): 784-792.
- Soloto, R. A., Crouse, M. Y. (1996) HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. US Geol. Survey Water Resources Investigations Report.
- Uhm, M. J., Moon, Y. H., Ahn, B. K., Shin, Y. K. (2008) Assessment of Water Quality and Pollutant Loads on Agricultural Watershed in Jeonbuk Province. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 27(2): 111-119.
- Yur, J. H., Kim, G. H. (2005) Comparison of Discharge Characteristics of NPS Pollutant Loads from Urban, Agricultural and Forestry Watersheds. *Journal of Korean Society on Water Quality* 21(2): 184-189.