

L-THIA 2012 유출 및 수질 자동 보정 모듈을 이용한 유출/비점부하량 산정 및 비점오염 부하량 포텐셜 등급화

장춘화 · 금동혁 · 하준수* · 김경순** · 강동한*** · 김극태*** · 신동식**** · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과

^{*}(주)그린텍 환경컨설팅

^{**}인하대학교 지리정보공학연구소

^{***}경기도 보건환경연구원

^{****}국립환경과학원

Evaluation of Runoff and Pollutant Loads using L-THIA 2012 Runoff and Pollutant Auto-calibration Module and Ranking of Pollutant Loads Potential

Chunhwa Jang · Donghyuk Kum · Junsoo Ha* · Kyoung-soon Kim** · Dong Han Kang*** · Keuk-Tai Kim**** ·
Dong Suk Shin**** · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

^{}Greentech Environment Consulting CO., LTD*

*^{**}Geoinformatic Engineering Research Institute, Inha University*

*^{***}Gyeonggi Institute of Health Environment*

*^{****}National Institute of Environmental Research*

(Received 5 October 2012, Revised 29 January 2013, Accepted 30 January 2013)

Abstract

Urbanization from agricultural/forest areas has been causing increased runoff and pollutant loads from it. Thus, numerous models have been developed to estimate NPS loading from urban area and Long-Term Hydrologic Impact Analysis (L-THIA) model has been used to evaluate effects of landuse changes on runoff and pollutant loads. However, the L-THIA model could not consider rainfall intensity in runoff evaluation. Therefore, the L-THIA model, capable of simulating runoff using 10-minute rainfall data, was applied to the study areas for evaluation of estimated runoff and NPS. The estimated Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) values were over 0.6 for runoff, BOD, TN, and TP for most sites and watershed. The calibrated model was further extended to other counties for pollutant load potential evaluation. Pollutant load potential maps were developed and target areas were identified. As shown in this study, the L-THIA 2012 can be used for evaluation runoff and pollutant loads with limited data sets and its estimation could be used in identifying pollutant load hot spot areas for implementation of site-specific Best Management Practices.

Key words : Auto-calibration, Direct runoff, Genetic algorithm, L-THIA 2012, Nonpoint source pollutant loads

1. 서론

그동안 한강수계 내 팔당호 수계에 수질개선을 위하여 많은 정책들이 실시되어 왔지만 실제적으로 수질개선 효과는 적은 것으로 나타났다(Choi, 2006; GRI, 2008). 2008년 팔당호 수질이 수질 목표인 Biochemical Oxygen Demand (BOD) 1mg/L를 초과하는 것으로 보아 다양한 팔당호 수질개선 사업은 가시적인 효과를 거두지 못하는 것으로 판단된다(PWEIC, 2008). 정부는 1995년 전국 비점오염원 조사를 통하여 비점오염이 수질 오염에 기여하는 수준이 Total Nitrogen(TN)의 경우 50% 이상, BOD와 Total Phos-

phorus(TP)는 20~30% 이상이 되는 것으로 분석하였다(Choi, 2006). 따라서 관리가 용이한 점오염보다는 그 발생범위가 광범위하여 관리와 규제가 어려운 비점오염저감 대책에 정책자와 연구자들은 주목해 오고 있으며, 환경부에서도 1998년부터 2005년까지 시행한 4대강 물관리종합대책을 통하여 비점오염관리의 중요성을 알리고 있다.

이러한 시·공간적으로 변화하는 비점오염저감 방안을 도출하기 위해서는 정확한 모니터링과 모델링 기법이 필요하게 되며 최근에는 수리·수문/비점 모형을 이용한 다양한 모델링 기법이 많이 사용되고 있다. 국내외에서는 다양한 종류의 모델들이 사용되고 있으며, 이 모델들은 크게 간단한 모형(general model)과 정교한 모형(detailed model)으로 나눌 수 있다(GRI, 2008). 간단한 모형의 경우 복잡한 물순

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

환 현상을 개념적인 수식을 이용하여 간단히 현상을 모의하는 것을 말하며, 복잡한 모형은 Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation (ANSWER) (Rewerts and Engel, 1991), Agriculture Nonpoint Source (AGNPS) (Young et al., 1987), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998) 모형 등과 같이 물순환 현상을 심층적인 과학적 분석을 통해 모의하는 것을 뜻한다.

하지만 이러한 복잡한 모형들은 사용자가 쉽게 다루기에는 전문성을 요하는 한계점이 있어 정책자나 실무자들은 주로 개념적 수식을 이용한 방법을 사용하고 있다. 현재 비점오염 부하량을 평가하기 위해서 환경부에서는 총량원 단위법을 많이 사용하고 있다(NIER, 2008). 그러나 총량원 단위법과 같은 원단위 평가 방법들은 지리, 식생, 토양, 기후 등 지역적 특성을 고려하지 않은 전국 연평균 Event Mean Concentration (EMC) 값을 주로 사용하고 있다(MOE, 1995; Kim et al., 2012; Won et al., 2009). 이로 인해 대상지역의 실측자료가 없을 때는 사용자가 지역조건에 맞는 EMC를 임의로 선택하거나 전국 평균 EMC를 사용해야하기 때문에 불확실성이 커질 수 있는 문제점이 있다. 그리고 미계측 지역의 유출을 평가할 때 우리나라에서는 문헌에서 제시하고 있는 기본 EMC값을 사용한다. 이 경우 대상 연구지역에 대한 강우-유출 및 토지이용 및 비점오염 발생 특성을 반영할 수 없게 된다.

이에 모형구동 방법이 손쉽고 입력자료 구축이 간단한 Long-Term Hydrological Impact Assessment (L-THIA) 모형이 Harbor(1994)에 의해 개발되었으며, 다양한 버전의 모형 모듈 개선을 통하여 현재까지 널리 사용되고 있다(Bhaduri et al., 1997; Jang et al., 2012; Lim et al., 2001; Minner et al., 1998). 이 중 공간적 조건을 반영하여 Curve Number (CN), EMC를 보정할 수 있는 L-THIA 2012 모형이 Jang et

al. (2012)에 의해 개발되었으며, 유전자 알고리즘을 이용하여 시단위 강우-유출 및 토지이용별/강우강도별 EMC 자동 보정 모듈이 L-THIA 2012 모형(Jang et al., 2012)에 탑재되어 있다. 이러한 L-THIA 2012 직접 유출 및 수질 자동 보정 모듈을 사용하면 대상지역의 토양 특성, 토지이용도, 공간적 조건을 반영한 직접유출량과 비점오염부하량을 보다 정확히 산정할 수 있다. 또한 모형구동 방법이 손쉽고 입력자료 구축이 간단하기 때문에 정책자나 실무자들이 사용하기에 용이하다. 최근 정부에서는 팔당호 수질 개선을 위해 팔당호 내 7개 시군의 모니터링을 실시하였으며, 이 모니터링 결과를 통한 수질 개선 우선 관리지역 선정을 수행 중에 있다. 이러한 수질 개선 우선 관리지역 선정을 위하여 모델링 기법을 사용하고 있으며, 다양한 모델링 기법 중 L-THIA 2012가 적용성이 높고, 실무자가 활용하기에 편이하다는 장점을 가지고 있어 본 연구에서는 팔당호 7개 시군 내 수질 개선 우선관리지역 선정을 위해 L-THIA 2012를 사용하였다.

본 연구에서는 도시구역 하천 수질관리를 위한 기초자료를 제시하기 위해 비점오염부하 포텐셜 등급화를 하였다. 비점오염부하 포텐셜이란 10년 대표강우와 대상지역의 지형, 토지이용, 토양 특성을 고려하여 비점오염부하 예상 발생량을 산정하는 것이며, 비점오염부하 포텐셜 등급화를 진행하는 목적은 대상지역이 본 연구와 같이 여러 시군을 기준으로 선정되어 있고 총량단위의 오염부하량 발생 우려지역을 선정할 때 보다 명확한 등급을 부여하여 비점오염부하량 발생 우려 지역 선정하기 위함이다.

따라서 본 연구의 목적은 1) L-THIA 2012 모형을 이용하여 한강수계 팔당호유역을 포함하고 있는 경기도 가평군, 광주시, 남양주시, 양평군, 여주군, 용인시, 이천시 내의 토구 및 소하천의 직접 유출 및 수질을 보정하여 모형의 적용성을 평가하는 것이며, 2) 이 직접 유출 및 수질을 보정

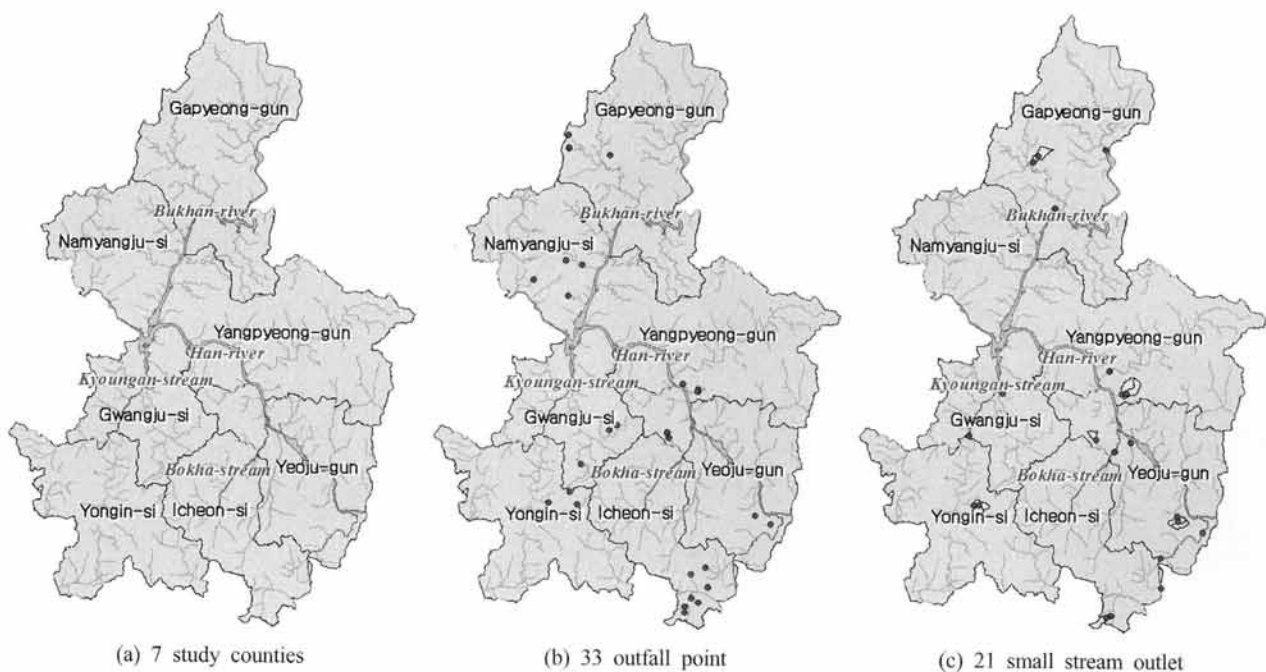


Fig. 1. Study area.

한 결과를 바탕으로 경기도 7개 시군에 확대 적용 평가를 통해 총량단위 기준으로 비점오염부하 포텐셜 등급화를 진행하는 것이다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 선정

팔당호유역의 도시지역 내 합류식 하수관거의 우수 토실 및 분류식 우수관거의 토구는 강우의 영향으로 잦은 월류를 발생시켜 팔당호 유역의 비점오염문제를 야기한다. 이러한 팔당호의 체계적이고 합리적인 수질개선을 위해서는 도시지역 내 하수관거의 우수 토실/토구에서 발생하는 비점오염 발생 현황을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 7개 시군내 실측 유출 및 수질 모니터링 자료가 있는 소하천과 토구를 연구 대상지역으로 선정하였다. 경기도 가평군, 광주시, 남양주시, 양평군, 여주군, 용인시, 이천시의 토구 33개 지점, 소하천 21개 지점의 직접 유출량 및 수질 측정 지점은 Fig. 1과 같다. 연구지역으로 선정된 7개 시군에서 용인시, 광주시, 남양주시, 이천시의 동 단위 이상의 지역은 도시지역 특성을 보이고 있으며, 광주시 면단위 지역, 여주군은 조사지점이 농촌지역의 특징을 보인다. 본 연구에서는 유출 및 BOD, TN, TP 비점오염부하량을 산정하여 비점오염부하포텐셜 지도를 작성하였다.

2.2. L-THIA 모형

토지이용변화에 따른 유출 및 비점오염 평가를 간단한 입력자료만으로 평가하기 위한 Screening 모형으로 미국에서 Harbor (1994)에 의해 L-THIA 모형이 개발되었으며, 지속적인 모듈개발로 다양한 버전의 L-THIA가 개선되었고 유출 및 비점오염부하량 산정을 위해 전 세계적으로 널리 사용되

고 있다(Bhaduri et al., 1997; Jang et al., 2012; Lim et al., 2001; Minner et al., 1998). 하지만 L-THIA 모형은 일단위 평가 모형이기 때문에, 단일 강우 이벤트에 의한 유출량 평가가 어렵고, 8가지 토지이용분류를 이용하기 때문에, 고밀도 도시지역/저밀도 도시지역 이외의 다양한 도시 개발 지역을 모의할 수 없는 한계가 있다. 또한 비점오염 부하량 산정시 미국 Texsa 지역의 EMC 자료(Lim et al., 2001)를 사용하는 제한점을 가지고 있다. 이에 Jang et al. (2012)은 Kum et al. (2012)이 개발한 시단위 강우량을 활용한 유출 모형을 10분 단위 강우량을 활용하도록 모형을 수정하여 다양한 강우강도 및 패턴에 따른 직접 유출 평가가 가능하도록 하였다. 또한 이벤트 단위 점오염/비점오염 평가가 가능한 EMC 자동 보정 모듈을 개발하여 L-THIA 모형을 개선하였다. 본 연구에서는 Jang et al. (2012)가 개발한 직접 유출 및 수질 자동 보정 모듈을 탑재한 L-THIA 2012 모형을 사용하였다. 이 L-THIA 2012모형의 자동 보정 모듈에는 수문 및 수질 모형의 자동 보정 모듈 개발에 널리 사용되는 Genetic Algorithm (GA)을 이용하였다. 이 GA는 자연 선택 과정 탐색을 기초로 하며 생물학적 진화의 추상적 개념을 이용해 연산자들이 선택(Selection), 교배(Crossover), 변종(Mutation)의 과정을 통하여 목적함수를 구성하고 변수들을 최적화 하는 알고리즘이다(Fig. 2). 또한 GA는 실제 유전자의 자연선택을 모방하기 위하여 실제 유전자가 가지게 되는 정보를 임의의 코드로 사용하게 된다. Goldberg (1989)는 0과 1을 이용하는 이진법을 이용하여 각각의 유전자가 가지고 있는 정보를 나타내었다. GA는 미국 미시건 대학 Holland (1975)에 의해 최초로 개발되었으며 다양한 연구 분야에서 사용되고 있다. 다양한 분야 중 수리수문분야에서도 사용되고 있으며, Mohan (1997)은 Muskingum 하도 추적 실험 추적식의 제한점을 극복하기 위하여 비선형 Muskingum

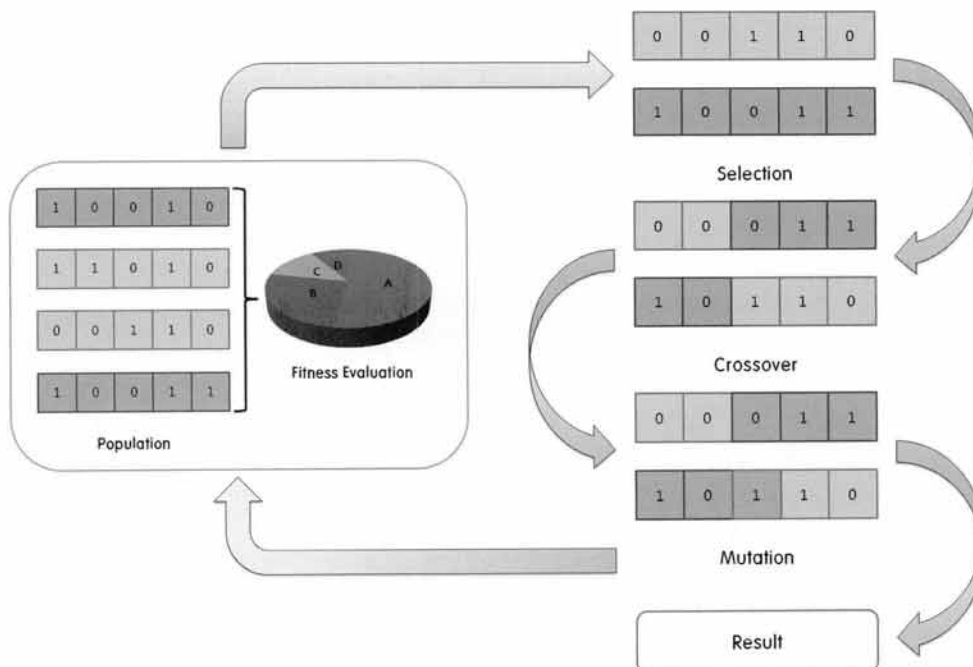


Fig. 2. Overview of genetic algorithm used in L-THIA 2012 (Jang et al., 2012).

보정에 GA를 활용하여 침투 유량 예측 정확성을 향상시켰다. 국내에서는 Lee and Kim (2001)이 GA를 이용하여 SSARR모형 보정을 통해 기존 수동 보정보다 GA를 이용한 자동 보정이 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 증명하였다. 그리고 Park et al. (2010)은 GA 기반 유달률 산정 모듈을 개발하여 상류에서 유실된 토양이 어떻게 유역 출구로 유출되는지 평가하였으며, Lim et al. (2010)은 GA를 이용하여 감수곡선법을 모의하기 위한 Digital filter의 최적 변수를 결정하는 BFI_{max} Analyzer 모듈을 개발하여 직접유출 및 기저유출 분리에 이용하였다. 이처럼 GA는 최근 수문 및 비점 모형 자동 보정에 널리 이용되고 있으며 본 연구에서는 직접 유출량 및 오염부하 보정을 위하여 Jang et al. (2012)가 개발한 GA 기반 직접 유출 및 수질 자동 보정 모듈이 탑재된 L-THIA 2012 모형을 사용하였다.

2.4. 입력자료 설명

본 연구에서는 직접 유출 및 수질 보정 평가를 위해 7개 시군 토구와 소하천의 2011년 6개 이벤트 10분 단위 강우 자료, 토지이용도, 토양도, DEM을 사용하였다. 토구 및 소하천의 직접 유출과 수질 보정을 통하여 산정한 최적 CN, 최적 EMC를 7개 시군단위 확대적용을 위하여 사용하였다. 확대 적용에 사용한 강우량 자료는 7개 시군 내 29개 관측소의 공간분포에 따른 강우량의 차이를 고려하기 위해 티센망도(Thiessen Network)를 작성하여 10년 대표 강우 티센계수를 산정하였으며, 이 티센계수를 각 7개 시군 내에 위치한 강우관측소의 2011년 자료에 곱하여 10년 대표 강우값으로 변환해 사용하였다(Fig. 3). 본 연구에서 사용한 토지이용도와 토양도는 지적도를 참고하여 구축하였으며, 이 중 토양도는 문헌상의 지목별 유출계수 자료를 사용하여 유출특성별로 군집화 하여 자료를 구축하였고 토지이용도는 지적도의 28가지 지목분류 항목을 L-THIA 2012 모형

(Jang et al., 2012)에 이용하기 알맞게 환경부 23가지 중분류 항목으로 재분류하여 구축하였다. 그리고 직접 유출을 모의할 때 필요한 경사도, 경사장을 구축하기 위하여 1:25,000 수치지도를 사용하였으며, 최대 경사장 길이는 122m (Foster et al., 1996)로 제한하였다.

2.5. 직접 유출량 및 비점오염부하량 보정 방법

본 연구에서는 한강수계 팔당호유역을 포함하는 경기도 가평군, 광주시, 남양주시, 양평군, 여주군, 용인시, 이천시의 유출 및 비점오염 부하량 산정을 위해 7개 시군 토구 및 소하천에 대한 직접 유출 및 BOD, TN, TP에 대한 비점오염부하량 보정을 수행하였다(Fig. 4). 보정에 사용한 입력 자료는 2011년 중 발생한 6개 강우 이벤트에 대한 각 지점의 10분단위 실측 직접유출량과 BOD, TN, TP 실측 비점오염부하량 자료이다. 직접 유출 보정을 위해 토구 및 소하천의 6개 이벤트 10분 단위 실측 강우량, 실측 직접 유출량을 사용하여 L-THIA 2012 유출 모형을 구동하였으며, L-THIA 2012에 탑재되어 있는 직접 유출 자동 보정 모듈을 이용하여 최적 CN을 결정하였다. 이 직접 유출 자동 보정 모듈은 유전자 알고리즘을 기반으로 Jang et al. (2012)에 의해 개발되었으며, 매뉴얼 보정에서 발생하는 불확실성을 감소시켰다. 또한 토구 및 소하천의 비점오염부하량 보정을 위해 직접 유출보정 유효지수 값이 0.5 이상인 지역에만하여 BOD, TN, TP에 대한 예측 비점오염 평가를 하였다. L-THIA 2012 자동 부하량 보정 모듈을 사용하여 강우강도별/중분류 토지이용별 보정을 실시하였고 7개 시군에 확대적용할 최적 EMC를 결정하였다(Fig. 4). 이 L-THIA 2012 부하량 자동 보정 모듈은 유전자 알고리즘 기반으로 되어 있으며, EMC값은 환경부에서 제시한 강우강도별/토지이용별 값을 기본값으로 사용하였다(GERC, 2009; HERC, 2009; NERC, 2009; YERC, 2009). 이때, 환경부에서 제시

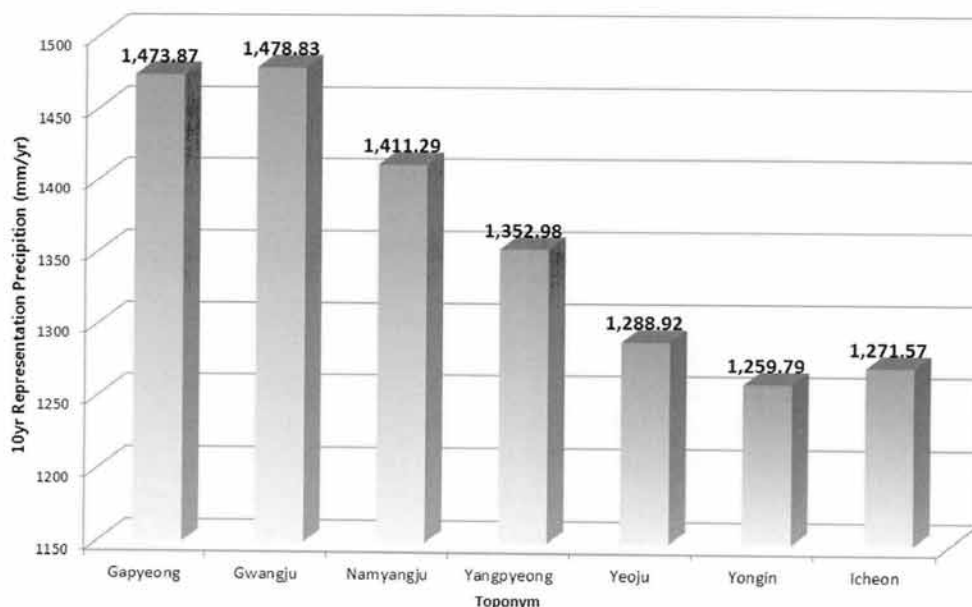


Fig. 3. 10 year representative precipitation using Thiessen coefficient.

Table 1. Event mean concentration (BOD)

Landuse classification	Korean ministry of environment - BOD EMC (mg/L)			
	Below 10 mm	10 ~ 30 mm	30 ~ 50 mm	Over 50 mm
URMD	6.1	7.3	7.0	2.8
UIDU	53.7	29.7	12.0	3.9
UCOM	16.8	21.1	20.4	9.8
UNMD	24.2	64.8	19.9	16.1
UTMD	12.3	6.8	5.5	2.3
UINS	7.9	9.0	4.8	4.7
RICE	4.0	3.9	3.9	3.7
AGRR	0.0	16.9	13.6	40.7
URML	7.8	11.8	11.0	12.4
ORCD	0.0	1.0	3.7	2.5
AGRL	0.0	0.0	4.4	2.0
FRSD	1.2	1.2	1.8	2.1
FRSE	1.1	1.1	1.2	0.9
FRST	1.2	1.8	1.8	0.9
BENM	4.6	6.1	6.2	3.9
PAST	3.6	6.8	3.9	3.4
AGRC	15.6	12.4	19.8	13.3

Table 2. Event mean concentration (TN)

Intermediate-classified landuse	Korean ministry of environment - TN EMC (mg/L)			
	Below 10 mm	10 ~ 30 mm	30 ~ 50 mm	Over 50 mm
URMD	7.1	7.0	2.7	6.4
UIDU	8.3	4.1	4.4	2.0
UCOM	2.8	3.1	2.1	1.5
UNMD	5.4	2.9	4.7	4.6
UTMD	3.0	2.6	2.2	1.1
UINS	7.3	5.9	1.6	6.7
RICE	2.2	2.5	3.1	2.7
AGRR	0.0	2.4	5.4	8.6
URML	2.2	4.5	5.5	4.5
ORCD	0.0	0.4	1.5	2.0
AGRL	0.0	0.0	10.1	5.7
FRSD	1.7	2.0	3.3	1.8
FRSE	1.8	1.9	2.4	1.7
FRST	1.8	0.6	1.6	1.8
BENM	7.1	4.8	6.9	4.9
PAST	2.0	2.6	2.4	2.0
AGRC	5.5	2.6	2.3	2.2

한 EMC값을 기준값으로 하여 EMC값의 +30%, -30% 내에서 부하량 보정이 이루어지도록 하였다(Table 1 ~ Table 3). Table 1 ~ Table 3에 제시한 강우강도별/토지이용별 EMC는 국립환경과학원에서 실시한 주요 비점오염원 유출 장기 모니터링 및 저감기법연구를 통해 산정된 값이며, 제시되어 있는 값 중 0.0으로 표기되어 있는 값은 실측 모니터링 중 강우 이벤트가 발생하였을 때 해당 토지이용에서 유출이 발생하지 않았기 때문이다.

2.6. 직접 유출량/비점오염 부하량 7개 시군 확대 적용 방법

대부분 실측 자료가 없는 미세측 지역의 경우 문헌에서

제공하는 Default CN, EMC를 사용하여 직접 유출과 비점 오염부하량을 평가하게 된다. 이 경우 대상지역 공간적 요소에 대한 고려 없이 유출 및 수질평가가 진행되므로 정확한 유출, 수질평가가 이루어졌다고 할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 대상지역의 공간적 요소를 고려하기 위하여 토구 및 소하천의 보정을 실시한 후 직접 유출 및 비점오염부하량의 유효지수가 0.5 이상인 Best CN을 선정하여 시군 확대 적용 평가에 사용하였다(Fig. 5). 최적 CN이란 유효지수가 0.5이상인 반면 보정 유효지수가 가장 높은 값을 뜻하고 Second Best CN은 Best CN 다음으로 높은 유효지수의 CN값을 뜻한다. 토구 및 소하천 직접 유출 보정 평가를 통하여 선정된 토구 및 소하천의 Best CN값을 시군

Table 3. Event mean concentration (TP)

Intermediate-classified landuse	Korean ministry of environment - TP EMC (mg/L)			
	Below 10 mm	10 ~ 30 mm	30 ~ 50 mm	Over 50 mm
URMD	0.2	0.2	0.2	0.4
UIDU	1.2	0.6	0.1	0.1
UCOM	1.3	0.5	1.3	1.4
UNMD	1.8	0.7	0.5	0.7
UTMD	1.3	0.2	0.2	0.1
UINS	0.3	0.3	0.1	0.7
RICE	0.2	0.6	0.3	0.4
AGRR	0.0	2.4	2.3	10.3
URML	0.6	1.7	3.2	2.1
ORCD	0.0	0.1	0.2	0.4
AGRL	0.0	0.0	1.3	1.4
FRSD	0.1	0.1	0.2	0.5
FRSE	0.1	0.0	0.0	0.0
FRST	0.1	0.0	0.1	0.0
BENM	1.5	1.3	1.9	1.5
PAST	0.5	0.6	0.3	0.7
AGRC	0.2	0.9	0.7	0.7

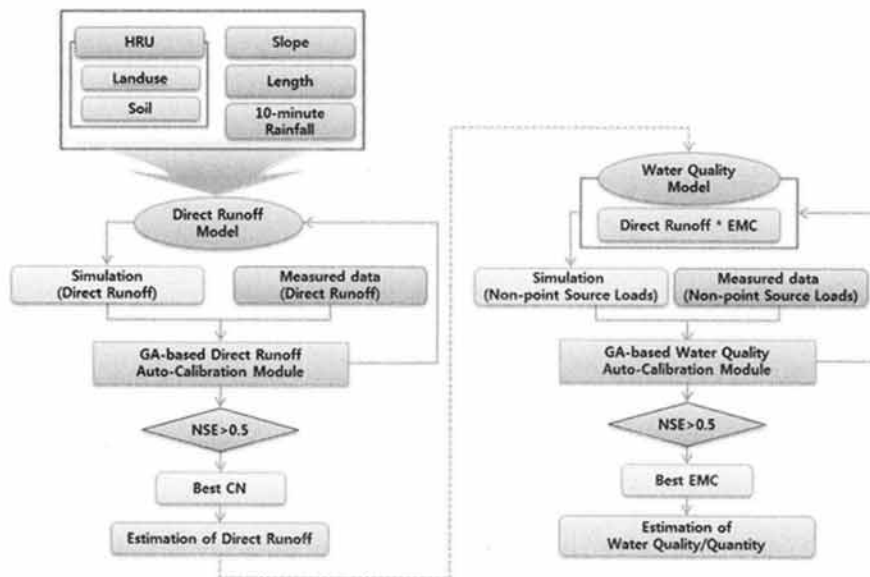


Fig. 4. Method of direct runoff and pollutant calibration.

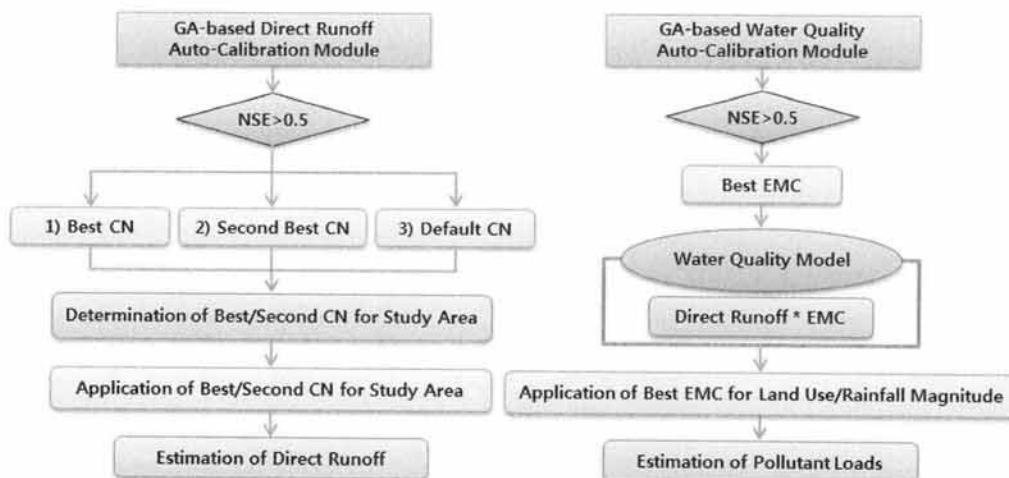


Fig. 5. Application of calibrated L-THIA 2012 to the study area.

단위 확대적용을 위해서 본 연구에서는 Best CN값뿐만 아니라 Second Best CN, 다양한 문헌을 통해 얻은 Default CN값을 적용하였다. 이는 토구 및 소하천 최적 CN값에 해당하는 토지이용도와 토양도 조합(HRU)이 시군으로 확대했을 때 해당 HRU가 없는 경우가 있었으므로 이 HRU에 유효지수가 0.5이상이면서 두 번째로 유효지수가 가장 높은 Second Best CN을 적용하도록 하였다. 하지만 Second Best CN을 적용하여도 해당되는 HRU가 없는 시군이 있을 경우 문헌에서 제시한 Default CN값을 적용하였다. 토구 및 소하천의 비점오염부하량 보정 평가를 통하여 산정된 EMC값은 직접 유출 보정값과 마찬가지로 유효지수가 최소 0.5 이상이 되는 지점의 EMC를 사용하였다. 부하량 보정 평가를 실시한 후 각 시군에 해당하는 최적 EMC가 산정되지 않은 지역이 있을 경우에는 최적 EMC가 산정된 지역의 EMC를 산술평균한 값을 적용하였다. 본 연구에서는 토구 및 소하천의 최적 CN, EMC값을 적용하여 7개 시군으로 확대적용평가를 수행한 후 총량단위기준으로 오염 부하 포텐셜 등급화 지도를 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. L-THIA 2012 적용성 평가

L-THIA 2012 직접 유출자동보정 모듈과 수질자동보정 모듈을 사용하여 7개 시군 내 토구 및 소하천의 직접 유출, BOD, TN, TP에 대한 수질 보정을 실시하였다. 이 자동보정 모듈을 사용함으로써 매뉴얼 보정과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 감소시켰으며, 보다 객관적인 보정결과를 얻었다. L-THIA 2012의 적용성 평가를 위해 유효지수(NSE)를 이용하였고 NSE가 0.40 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것이며(Ramanarayanan et al., 1997), 일반적인 모형의 효율 범위와 신뢰구간은 Table 4의 기준을 사용하였다. 본 연구에서는 7개 시군 내 토구와 소하천에 직접 유출보정을 실시한 결과 토구의 경우 양평과 가평을 제외한 지역에서 유효지수가 높게 나타났으며(Table 5), 소하천의 경우 양평과 가평 지점에서 유효지수가 가장 높게 산정되었다(Table 6). 이로써 직접 유출 자동 보정 모듈을 탑재한 L-THIA 2012가 유출을 잘 모의하는 것으로 판단된

Table 4. Criteria for evaluating model performance (Donigian, 2000)

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE	< 0.6	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	> 0.80

Table 5. Result of direct runoff calibration (outfall)

Outfall	NSE	Outfall	NSE
Icheon 5	0.869	Namyangju 4	0.994
Icheon 6	0.982	Yongin 1	0.964
Icheon 7	0.750	Yongin 2	0.991
Gwangju 1	0.920	Yeoju 1*	0.794
Gwangju 2	0.932	Yeoju 2	0.946
Gwangju 4	0.690	Yeoju 4	0.930
Namyangju 1	0.760	Yeoju 5	0.861

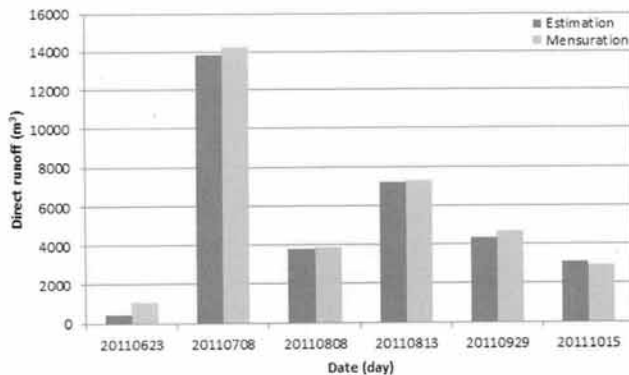
*Jang et al., 2012

Table 6. Result of direct runoff calibration (Small stream)

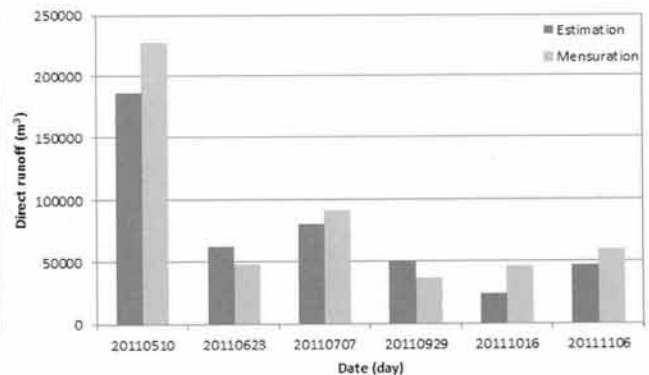
Small stream	NSE	Small stream	NSE
Yangpyeong	0.583	Gapyeong	0.892

다. Fig. 6은 토구 중 유효지수가 가장 높게 산정된 남양주 4지점과 소하천 중 유효지수가 가장 높게 산정된 가평지점의 실제 직접유출량과 예측 직접유출량을 비교한 결과이다. 남양주 4지점은 직접유출 보정을 통해 유출 형상이 잘 모의되었음을 알 수 있으며 가평 지점의 경우 토구인 남양주 4지점보다는 낮은 유효지수를 갖지만 Table 4를 기준으로 보았을 때 Very Good에 해당하여 모형을 이용한 유출모의가 잘 모의되었다고 판단된다.

BOD, TN, TP 비점오염 보정을 위해서 L-THIA 2012 부하량 자동보정 모듈을 사용하였으며, 이 보정 모듈을 통하여 산정된 최적 EMC는 모두 +30%, -30%의 값 이내의 값으로 모의되었다. 비점오염부하량별 유효지수를 분석한 결과 TN 보정에 의해 부하량이 가장 잘 모의되었으며, TP의 경우 여주1만이 유효지수가 높게 모의되었다(Table 7). 7개 시군 중 여주, 이천, 광주, 남양주 내에 위치한 토구에서는 실제 비점오염부하량과 예측 비점오염부하량의 상관관계가 높게 모의되었다.



(a) Namyangju-4 station (Outfall)



(b) Gapyeng station (Small stream)

Fig. 6. Result of auto-calibration using L-THIA 2012.

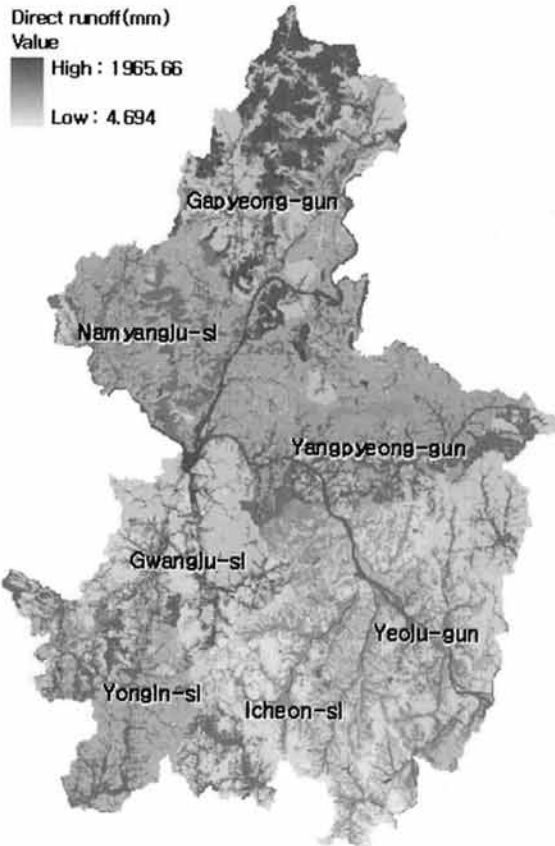
Table 7. Result of nonpoint source loads calibration

Outfall	Load	NSE	Outfall	Load	NSE
Yeosu 1*	BOD	0.654	Icheon 5	BOD	0.608
	T N	0.798		T N	0.755
	T P	0.974	Gwangju 2	T N	0.766
Yeosu 2	T N	0.897	Namyangju 1	T N	0.732
Yeosu 4	T N	0.670			

*Jang et al., 2012

3.2. 7개 시군 직접 유출 및 비점오염부하량 분석결과

본 연구에서는 7개 시군의 토구 및 소하천의 보정결과로 산정된 최적 CN, 최적 EMC를 시군으로 확대적용하여 직접 유출 및 비점오염부하량을 평가하였다. 확대적용에 사용한 강우자료는 2011년 자료로 바탕으로 산정한 10년 대표 강우량을 사용하였으며, 7개 시군의 직접 유출모의를 결과를 GIS지도로 표현하기 위하여 직접 유출량을 셀 단위 유출심으로 지도를 작성하였다(Fig. 7). Fig. 7의 GIS 유출심 지도를 보았을 때 가평군에서 직접유출발생이 가장 클 것으로 분석되었으며, 이는 가평의 유출 포텐셜이 다른 지역 보다 컸기 때문이라 판단된다. Fig. 3의 10년 대표 강우량만을 고려한다면 광주지역의 10년 대표 강우량이 가장 커 유출 또한 가장 클 것이라 판단될 수 있으나, 본 연구에서는 10년 대표강우량 뿐만 아니라 토지이용/토양도를 고려하여 유출 포텐셜을 분석하였기 때문에 광주지역이 아닌 가평지역의 유출 포텐셜이 가장 클 것으로 평가되었다.

**Fig. 7.** Result of direct runoff at study area.

각 지역의 EMC 보정값을 7개 시군에 확대 적용하였을 때 GIS 비점오염부하량 지도는 Fig. 8과 같다. TP EMC값의 경우 여주 1지점만 보정값이 0.5 이상으로 높게 모의되었으므로 7개 시군에 동일한 TP EMC값을 적용하였다. 7개 시군의 TP 비점오염부하량을 산정해 본 결과 가평군에서 1,015,628 kg/yr로 가장 높은 수치가 모의되었다. BOD와 TN도 가평에서 가장 높은 비점오염부하량이 모의되었으며, 각 4,806,198 kg/yr, 1,015,628 kg/yr의 수치가 모의되었다. 이는 가평의 유출량이 다른 시군에 비해 높게 모의되어서 그 영향을 받은 것으로 사료된다. 10년 대표강우량을 사용하여 7개 시군의 비점오염부하량을 산정하였을 때 7개 시군 총 비점오염부하량은 BOD의 경우 22,037,085 kg/yr, TN은 11,276,581 kg/yr, TP는 4,267,199 kg/yr가 발생할 것으로 예측되었다(Table 8).

3.3. 비점오염부하 포텐셜 등급화

확대적용한 비점오염부하량을 59개 총량소유역을 기준으로 비점오염부하 포텐셜 등급 지도를 작성한 결과는 Fig. 9와 같다. 이 비점오염부하 포텐셜 등급은 면적단위당 부하가 높은 지역을 기준으로 하여 등급을 나누었으며, Fig. 9 지도에서 1등급은 비점오염부하량이 가장 큰 지역을 나타낸다. BOD 포텐셜 등급 지도에서 BOD 부하량이 가장 큰 지역은 여주군으로 평가되었으며, TN 부하량의 경우 가평군과 양평군에 주로 밀집되어 있을 것으로 평가되었다. TP 부하량 등급의 경우 가평군에서 가장 많은 TP 부하량이 발생할 것으로 평가되었으며, 그 다음은 이천시가 가장 많은 TP 부하량이 발생할 것으로 평가되었다. BOD 등급 지도에서 단위면적당 부하량이 가장 높은 총량소유역은 북하 A3지역으로 단위면적당 6,253 kg/km²·yr가 발생할 것으로 평가되었다. TN 등급 지도에서 단위면적당 부하량이 가장 높은 지역은 가평 A1지역으로 2,475 kg/km²·yr이 발생할 것으로 평가되었으며, TP 등급 지도에서 단위면적당 부하량이 가장 높게 모의된 총량소유역은 가장 많은 BOD 부하량이 발생한 북하 A3지역으로 913 kg/km²·yr의 TP 부하량이 발생할 것으로 평가되었다. 비점오염부하 등급이 높게 평가된 북하 A3지역은 이천시에 위치해 있고 비점오염 측면의 영향이 큰 대지비율이 12.3%로 다른 지역에 비해 높은 밀도를 나타낸다. 가평 A1 지역은 인구밀도는 낮으나 10년 대표강우 비교에서 다른 지역에 비해 많은 강우가 발생한 것으로 나타났으며, 이 영향으로 높은 최적 CN이 도출되었다. 높은 최적 CN에 의해 유출이 증가하였고 실측 비점오염원이 다른 지역에 비해 높아 최적 EMC 산정이 높게 산정되어 비점오염부하량 포텐셜 등급이 높을 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 L-THIA 2012 유출/수질 자동 보정 모듈을 사용하여 한강수계 팔당호를 포함하고 있는 경기도 7개 시군의 유출 및 비점오염부하량을 보정하고 시군단위로 확

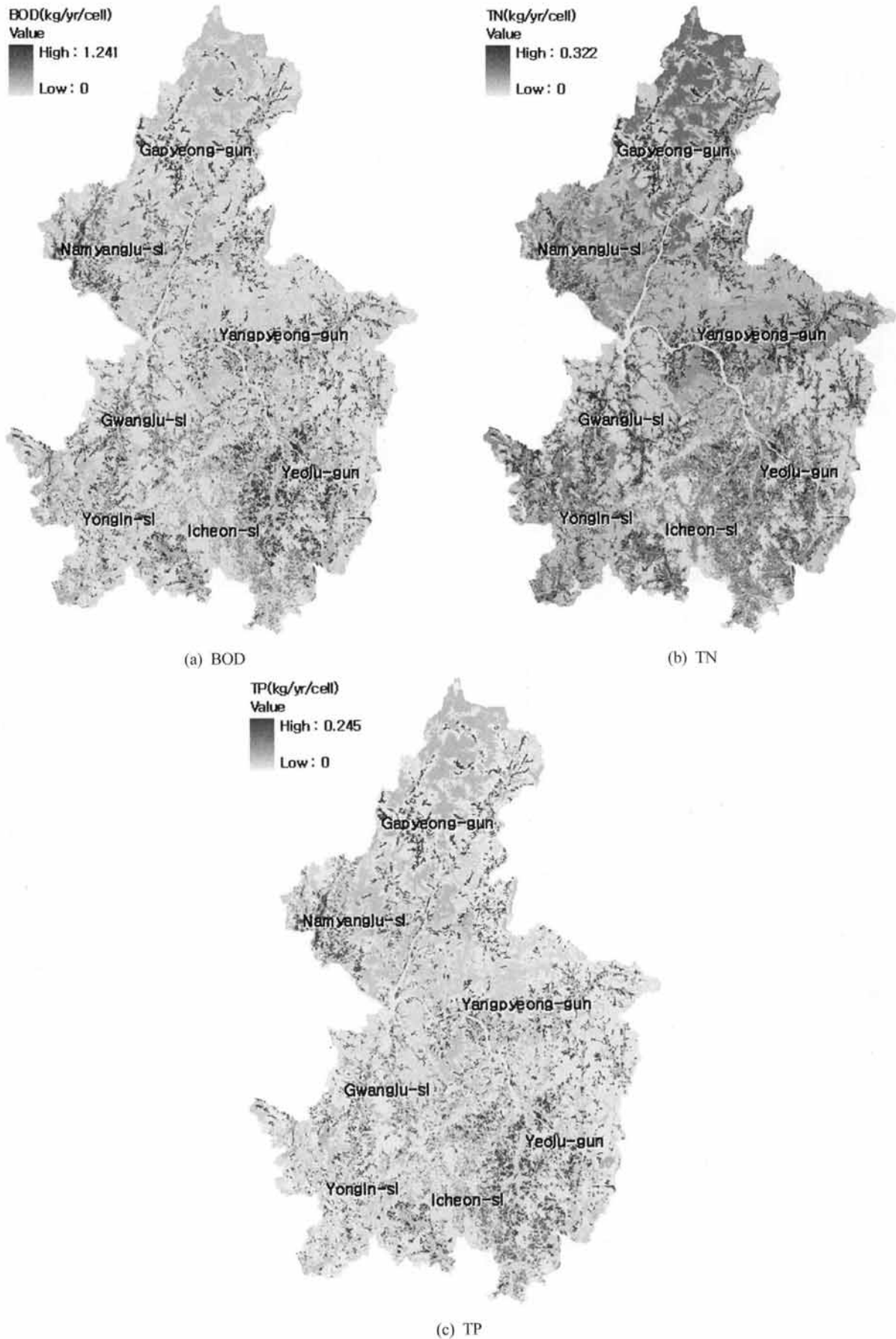


Fig. 8. Result of nonpoint source loads at study area.

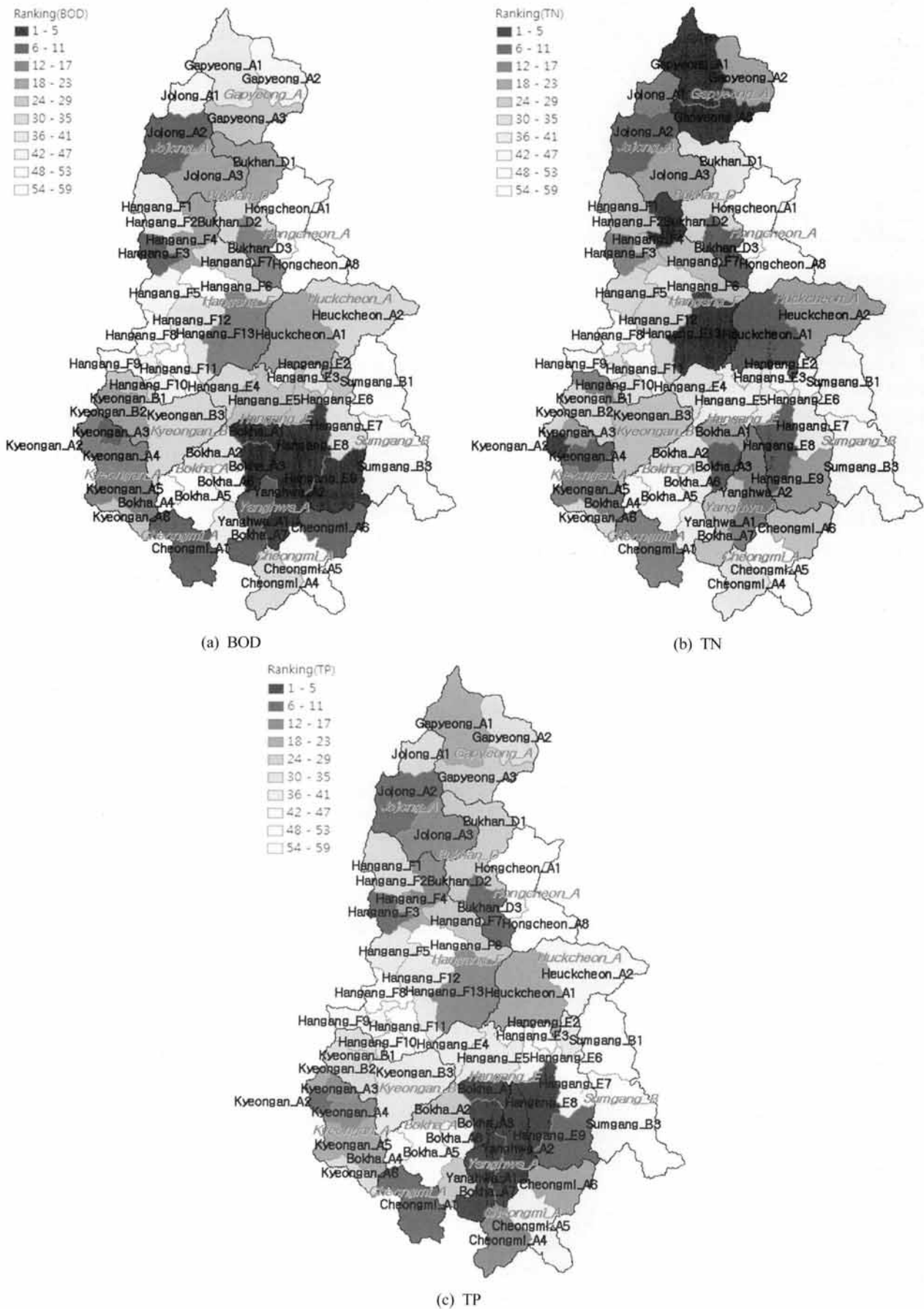


Fig. 9. Nonpoint source potential at study area.

Table 8. Result of nonpoint source loads

Location	BOD (kg/yr)	TN (kg/yr)	TP (kg/yr)
Gyeonggi-gun	4,806,198	2,769,894	1,015,628
Gwangju-si	1,836,079	987,863	351,671
Namyangju-si	1,012,294	569,909	200,897
Yangpyeong-gun	4,363,427	2,528,738	440,565
Yeosu-gun	4,538,055	1,904,718	902,186
Yongin-si	2,191,312	1,111,230	440,565
Icheon-si	3,289,720	1,404,229	915,687
Total	22,037,085	11,276,581	4,267,199

대적용하여 오염부하포텐셜 지도를 작성하였다. 이 연구에서는 경기도 7개 시군 내 토구 및 소하천의 유출보정, 비점오염부하량 보정을 통하여 모델의 적용성을 평가하였으며, 이를 실측치가 없는 7개 시군 단위로 확대적용하여 비점오염부하 포텐셜을 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 토구 및 소하천을 직접 유출, 수질 자동 보정 모델을 사용하여 직접 유출량 및 비점오염부하량을 보정평가를 한 결과 유효지수가 0.5이상인 지점이 토구의 경우 7개 시군 각 지점에 2지점이상, 소하천 지역에서 가평, 양평의 유효지수가 0.5이상으로 평가되었으므로 L-THIA 2012 자동 보정 모델이 유출 현상과 수질을 잘 모의하는 것으로 판단된다. 그러나 수질의 경우 여주 1지점의 TP 보정 결과만 높게 평가되었으므로 TP 항목에 대한 추가적인 장기 모니터링과 자료수집이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 소단위 지역 보정을 통해 모의한 최적 CN, 최적 EMC를 7개 시군에 확대 적용한 결과 가평의 유출심 및 비점오염부하량이 가장 높을 것으로 평가되었다. 가평의 BOD 비점오염부하량은 4,806,198 kg/yr로 가장 높았으며, TN 비점오염부하량은 2,769,894 kg/yr, TP 비점오염부하량은 1,015,628 kg/yr가 발생하여 가장 높은 비점오염부하량이 발생할 것으로 평가되었다.
- 3) 본 연구에서는 토구 및 소하천의 실측/예측 보정을 통하여 실측치가 없는 시군 단위로 확대적용하는 평가방법을 사용하고 있으며, 이러한 방법은 소단위 토구/유역의 실측 모니터링 값만 존재하는 지역의 비점오염 우선관리 지역을 선정하는데 적용될 수 있는 평가 방법으로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.
- 4) 본 연구를 통하여 L-THIA 2012 직접 유출 및 수질 자동 보정 모델이 유출 현상 및 수질 모의에 적용성이 뛰어난 것이 입증되었으므로 이 L-THIA 2012를 사용하여 환경부 수질오염총량제도 또는 최적관리기법 이행에 적용할 시 기존 비점오염평가 방법보다 정확한 부하량을 모의할 수 있을 것이라 판단된다.
- 5) 본 연구에서 사용한 확대적용 평가 방법은 토구와 소하천을 시군단위로 확대 적용하는데 있어 지역 내 다수의 모니터링 결과가 있어야 더 정확한 모델링 결과를 얻을 수 있다는 점이다. 하지만 다수의 모니터링 결과를 얻기 위해서는 시간적, 인력적, 비용적 한계가 있어 본 연구

에서는 진행하지 못했다.

본 연구를 통해 L-THIA 2012 모델이 간단한 자료구축만으로도 유출 및 비점오염부하량 평가에 사용될 수 있으며, 우심지역 선정과 이 우심지역에 최적관리기법 이행을 위한 평가 모듈로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 강원대학교 환경연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 깊은 감사드립니다.

References

- Arnold, J. G., Sribuvasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Bhaduri, B., Minner, M., Tatalovich, S., and Harbor, J. (1997). Assessing the Long-term Hydrological Impact of Land-use Change: Cuppy-McClue Watershed, Indiana, *Journal of the American Water Work Association*, 89, pp. 13-19.
- Choi, J. Y. (2006). Bi-jeom-o-yeom-won-gwan-li-ui hyeon-hwang-gwa jeon-mang, Water for Future, *Journal of Korea Water Resources Association*, 39(12), pp. 12-18. [Korean Literature]
- Donigan, A. S. (2000). *HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture #19, Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22*, EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., USA. pp.19-22.
- Foster, G. R., Renard, K. G., Yoder, D. C., McCool, D. K., and Weesies, G. A. (1996). *RUSLE User's Guide, Soil and Water Conservation Society*, pp. 173.
- Geumriver Environment Research Center (GERC). (2009). *Ju-yo bi-jeom-o-yeom-won yu-chul jang-gi mo-ni-teo-ling mich jeo-gam gi-beob yeon-gu*, Geumriver Environment Research Center, pp. 23-218. [Korean Literature]
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Eddison-Weley Publishing Co., pp. 1-432.
- Gyeonggi Research Institute (GRI). (2008). *Bi-jeom o-yeom-won san-jeong gi-beob-ui jeong-chaeg hwal-yong bang-an yeon-gu, jeong-chaeg-yeon-gu 2008-33*, Gyeonggi Research Institute, pp. 25-60. [Korean Literature]
- Hanriver Environment Research Center (HERC). (2009). *Ju-yo bi-jeom-o-yeom-won yu-chul jang-gi mo-ni-teo-ling mich jeo-gam gi-beob yeon-gu*, Hanriver Environment Research Center, pp. 43-350. [Korean Literature]
- Harbor, J. M. (1994). A Practical Method for Estimating the Impact of Land-Use Change on Surface Runoff, Groundwater Recharge and Wetland Hydrology, *Journal of American Planning Association*, 60(1), pp. 95-108.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The MIT Press, pp. 1-228.
- Jang, C. H., Kum, D. H., Ha, J., Kim, K., Kang, D. H., Kim,

- K., Shin, D. S., and Lim, K. J. (2012). Development of L-THIA 2012 Direct Runoff and Pollutant Auto-Calibration Module using Genetic Algorithm, Proceedings of the 2012 KSAE Annual Conference, *The Korean Society of Agricultural Engineer*, pp. 46. [Korean Literature]
- Kim, S. J., Shin, S. M., Jeon, Y. T., and Won, C. H. (2012). Washoff Characteristics of Non-point Source pollutants and Estimation of Unit Loads in Suburban Industrial Complex Areas Runoff, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(2), pp. 315-325. [Korean Literature]
- Kum, D. H., Ryu, J. C., Choi, J. W., Shin, M. H., Shin, D. S., Cheon, S. U., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2012). Development and Evaluation of Runoff-Sediment Evaluation System and BMPs Evaluation Modules for Agricultural Fields using Hourly Rainfall, *Journal of Korean Society on water Environment*, 28(3), pp. 375-383. [Korean Literature]
- Lee, K. S. and Kim, S. U. (2001). Automatic Calibration of SSARR Model with Genetic Algorithm, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 21(3), pp. 171-183. [Korean Literature]
- Lim, K. J., Engel, B. A., Kim, Y., Bhaduri, B., and Harbor, J. (2001). Development of the Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) WWW System, *10th International Soil Conservation*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 1018-1023.
- Lim, K. J., Park, Y. S., Kim, J., Shin, Y., Kim, N. W., Kim, S., Jeon, J., and Engel, B. A. (2010). Development of Genetic Algorithm-based Optimization Module in WHAT System for Hydrograph Analysis and Model Application, *Journal of Computers & Geoscience*, 36(2010), pp. 936-944.
- Miner, M., Harbor, J., Happold, S., and Michael-Butler, P. (1998). Cost Apportionment for a Storm Water Management System: Differential Burdens on Landowners from Hydrologic and Area-based Approaches, *Applied Geographic Studies*, 14, pp. 1-14.
- Ministry of Environment (MOE). (1995). *Bi-jeom o-yeom-won jo-sa yeon-gu sa-eob bo-go-seo*, Ministry of Environment, pp. 21-30. [Korean Literature]
- Morhan, S. (1997). Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models using Genetic Algorithm, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), pp. 137-142.
- Nakdongriver Environment Research Center (NERC). (2009). *Ju-yo bi-jeom-o-yeom-won yu-chul jang-gi mo-ni-teo-ling mich jeo-gam gi-beob yeon-gu*, Nakdongriver Environment Research Center, pp. 32-512. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2008). *Bi-jeom o-yeom-won je-eo-leul-wi-han gwan-li bang-an*, National Institute of Environmental Research, pp. 377-403. [Korean Literature]
- Paldang Water Environment Improvement Center (PWEIC). (2008). *2008 Pal-dang baeg-seo*, Paldang Water Environment Improvement Center, pp. 19-21. [Korean Literature]
- Park, Y. S., Kim, J., Kim, N. W., Kim, S., Jeon, J., Engel, B. A., Jang, W., and Lim, K. J. (2010). Development of New R, C and SDR Modules for the SATEEC GIS System, *Journal of Computers & Geoscience*, 36(2010), pp. 727-734.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management, *ASAE International Meeting*, Paper 97-2209, pp. 1-7.
- Rewerts, C. C. and Engel, B. A. (1991). ANSWERS on GRASS: Integrating a Watershed Simulation with a GIS, *Transactions of the ASABE*, 91(2621), pp. 8.
- Won, C. H., Choi, Y. H., Seo, J. Y., Kim, K. C., Shin, M. H., and Choi, J. D. (2009). Determination of EMC and Unit Loading of Rainfall Runoff from Forestry-Crops Field, *Journal of Korean Society on water Environment*, 25(4), pp. 615-623. [Korean Literature]
- Yeongsanriver Environment Research Center (YERC). (2009). *Ju-yo bi-jeom-o-yeom-won yu-chul jang-gi mo-ni-teo-ling mich jeo-gam gi-beob yeon-gu*, Yeongsanriver Environment Research Center, pp. 29-265. [Korean Literature]
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D., and Anderson, W. P. (1987). *AGNPS, Agricultural Non-point Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool*, USDA, Conservation Research Report 35, Washington D. C., pp. 77.