

L-THIA모형을 이용한 수질오염총량관리제 토지계 T-P 발생부하량 산정방식의 개선 Enhancement of Estimation Method on the Land T-P Pollutant Load in TMDLs Using L-THIA

류지철 · 김은정 · 한미덕 · 김용석 · 금동혁* · 임경재* · 박배경[†]
Jichul Ryu · Eunjung Kim · Mideok Han · Young Seok Kim
Donghyuk Kum* · Kyoung Jae Lim* · Bae Kyung Park[†]

국립환경과학원 유역총량연구과 · *강원대학교 지역건설공학과

Water Pollution Load Management Division, National Institute of Environmental Research

*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(2013년 12월 11일 접수, 2014년 2월 17일 채택)

Abstract : In this study, the uncertainty analysis of present land pollutant load estimation with simplified land category in TMDLs was performed and the enhanced method for land pollutant load estimation with level II land cover consisting of 23 categories was suggested, which was verified by L-THIA model. For land TP load estimation in Jinwi stream basin, the result of comparison between existing method with simplified land category (Scenario 1) and enhanced method with level II land cover (Scenario 2) showed high uncertainty in existing method. TP loads estimated by Scenario 2 for land covers included in the site land category were in the range of 3.45 to 56.69 kg/day, in which TP loads differed by sixteen times as much among them. For application of scenario 2 to TMDLs, Land TP loads were estimated by matching level II land cover to 28 land categories in serial cadastral map (Scenario 3). In order to verify accuracy of TP load estimation by scenario 3, the simulation result of L-THIA was compared with that and the difference between the two was as little as 10%. The result of this study is expected to be used as primary data for accurate estimation of land pollutant load in TMDLs.

Key Words : L-THIA, Land Category, Land Pollutant Load, TMDLs, T-P

요약 : 본 연구에서는 수질오염총량제의 토지계 발생부하량 산정 방식에서의 지목 단순화로 인한 불확실성을 분석하고, 23개 중분류 토지피복도를 기존 산정방식에 적용하여 지목 확장을 할 수 있도록 개선하였으며 이를 L-THIA 모형을 이용하여 검증하였다. 진위천 유역에 대하여 지목이 단순화된 기존 방식(시나리오 1)과 23개 중분류 토지피복도를 이용한 방식(시나리오 2)으로 산정된 TP 부하량을 비교한 결과 기존 방식의 불확실성이 높다는 것이 나타났으며, 시나리오 2에 의한 분석 결과 같은 대지 분류에 속하는 토지피복도에서 T-P 발생부하량의 편차가 3.45 kg/day~56.69 kg/day로 약 16배의 차이를 보였다. 시나리오 2를 수질오염총량제에 적용할 수 있도록 23개 중분류 토지피복을 지적도 기반 지목으로 매칭하여 TP 발생부하량을 산정하였다(시나리오 3). 개선된 방식(시나리오 3)의 토지계 T-P 발생부하량 산정의 정확도를 검증하기 위해 L-THIA 모형의 결과와 비교하였으며 모형 예측 대비 약 10% 정도로 차이가 매우 적게 나타났다. 본 연구결과는 향후 수질오염총량제의 토지계 발생부하량 산정의 정확도를 높이는 데 있어 기초자료로 사용될 수 있을 것이라 기대된다.

주제어 : 발생부하량, 수질오염총량제, 지목, L-THIA, T-P

1. 서론

현재 우리나라는 수질환경 개선을 위해 수질오염총량제를 4대강 수계(한강, 낙동강, 영산강, 금강)를 대상으로 시행하고 있다. 수질오염총량제는 기존의 농도규제 방식의 한계를 보완하고자 수계를 단위유역으로 구분하고 말단지역에 목표수질을 설정한 후, 이를 달성할 수 있도록 오염부하량을 할당하여 관리하는 제도이다.^{1,2)}

낙동강을 비롯한 3대강 수계는 2010년 제1단계 수질오염총량제가 종료되었으며, 2015년까지 2단계 수질오염총량제가 시행되고 있다. 1단계 시행결과, 3대강 모두 제도가 시행되기 전보다 2010년 BOD 배출오염부하량이 감소하였으며 주요 상수원 및 대표지점의 2010년 BOD 수질이 2004년 대비 55.8~88.8% 수준으로 개선되는 등 전체 92개 단위유역 중

77개 단위유역에서 목표수질을 만족하는 성과를 보였다.³⁾

이와 같이 수질개선에 크게 기여한 수질오염총량제에서는 유역에서 발생되어 하천에 영향을 주는 오염원을 총 6종류(생활계, 축산계, 토지계, 산업계, 매립계, 양식계)로 나누어 정의하고 있으며, 각각의 오염원을 점과 비점오염원으로 나누어 관리하고 있다.⁴⁾ 6개 오염원은 각각 점과 비점으로 구분하여 발생 및 배출부하량을 산정하는데, 이 중 토지계 오염원은 타 오염원에 비해 비점오염원에 의한 배출부하량 비율이 높고, 비점저감시설의 삭감부하량 산정에도 이용되기 때문에 토지계 발생부하량 산정의 정확성을 높이는 것이 비점오염원 관리에 있어 매우 중요한 부분을 차지하고 있다.

현재 수질오염총량제에서는 토지계 발생부하량의 산정을 위해 지적도를 기초로 한 총 5개 지목(전, 답, 임야, 대지, 기타)에 발생원단위를 적용하여 산정하고 있다. 그러나 Choi⁵⁾

[†] Corresponding author E-mail: bkpark67@korea.kr Tel: 032-560-7403 Fax: 032-560-7978

연구에 따르면 같은 도시지역 대지일 경우에도 아파트, 단독주택지역, 상업지역, 공업지역, 도로에서의 T-P 기준 원단위의 차이가 1.1~4.8 (kg/ha/year)까지 날 수 있으며, Park⁶⁾의 연구에 따르면 같은 밭지역에서도 비닐하우스, 과수원 등에 따라 원단위의 기초자료가 되는 EMC (Event Mean Concentration)는 T-P의 경우 5.61~7.82 (mg/L)의 수준까지 차이가 있을 수 있다고 제시하였다. 이와 같이, 현재 수질오염총량제의 5개 지목에 의한 발생원단위는 지목의 단순화로 인해 토지계 발생부하량 산정에 있어 불확실성을 내포할 수 있다.⁸⁻¹⁰⁾

현재 환경부에서는 토지계 발생원단위 개선을 위한 중분류 토지피복별 비점오염원 장기유출 모니터링을 진행하고 있다. 그러나 수질오염총량제에서 사용하고 있는 지적도 기반 5개 지목은 환경부에서 실시하는 전국오염원조사 자료의 수집으로 인해 매년 업데이트가 되기 때문에 매년 면적의 변화를 고려하여 발생부하량을 산정 할 수 있지만, 중분류 토지피복자료는 매년 업데이트가 되지 않기 때문에 제도적으로 해마다 이행평가를 해야 하는 수질오염총량제에 적용하기에는 한계점이 있다.

따라서 토지계발생부하량의 정확도를 높이기 위한 기존 산정방식의 개선이 필요하며 이를 위해서는 모형을 통한 산정방식의 검증도 같이 수반되어야 한다.

유역의 오염부하량을 예측하는데 있어서는 SWAT, HSPF,

L-THIA 등 다양한 모형들이 사용되고 있으며 이 중 L-THIA 모형은 유출곡선식(Curve Number, CN)과 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 이용하여 유역에서의 직접유출량과 오염부하량을 예측하는 모델로 미국 Harbor에 의해 처음 개발되었으며, 입력자료 구축 및 모형구동이 간단하면서 예측율이 높아 유역의 수문 및 오염부하량 산정에 있어서 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 다양하게 사용되고 있다.¹¹⁻¹³⁾

따라서 본 연구의 목적은 5개 지목으로만 산정할 수 있는 수질오염총량제 토지계 발생부하량 산정 방식의 불확실성을 분석하고, 23개 중분류 토지피복도를 기존 수질오염총량제 토지계 발생부하량 산정 방식에 적용하여 지목 확장을 할 수 있도록 개선하는 것이며 개선된 방식을 L-THIA 모형을 이용하여 검증하는데 있다.

본 연구결과는 향후 수질오염총량제의 토지계 발생부하량 산정 개선방안의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.재료 및 방법

2.1. 연구대상지역 선정

본 연구의 대상지역은 수질오염총량제에서 가장 최근(2013년 8월 기준)시행계획을 수립한 진위A 단위유역을 대상으로

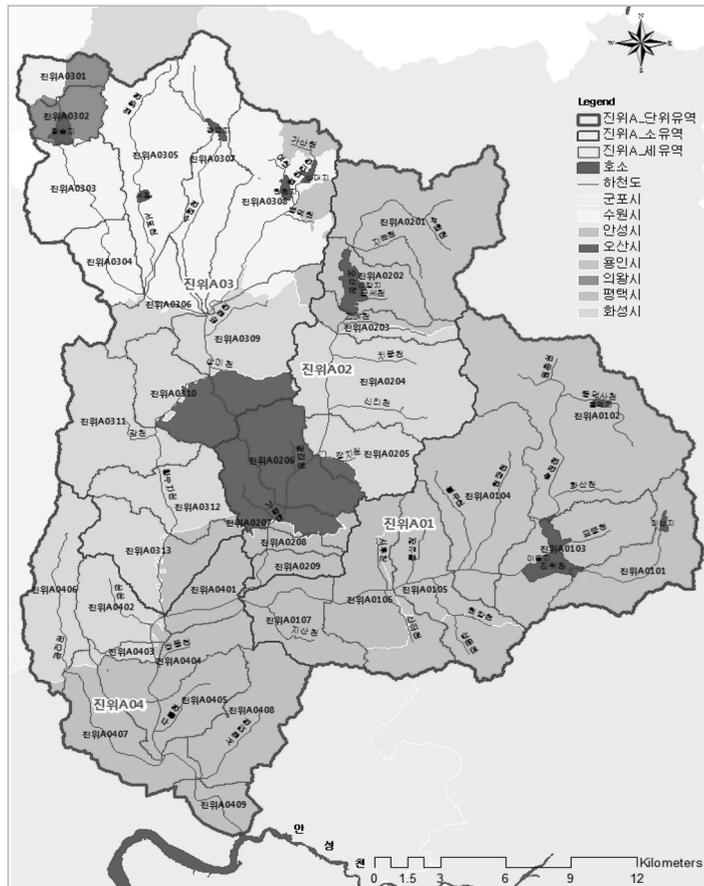


Fig. 1. Study area (Jinwi A).

로 하였다(Fig. 1). 진위A 단위구역의 토지피복은 시가화지역 23.9%, 농업지역 33.8%로 시가화 및 농업지역이 골고루 혼재되어 있으며, 상류 영향을 받지 않는 독립 단위구역이기 때문에 본 연구 결과의 대표성을 적절히 반영할 수 있을 것이라 판단하여 연구대상지역으로 선정하였다.

4개의 소유역으로 이루어진 진위A 단위구역의 면적은 총 735.22 km²에 달하며, 국가하천 안성천의 제1지류로서 용인시 남사면과 이동면을 북으로 하고 안성시 양성면과 원곡면을 남으로 하여 동에서 서측으로 유하다 평택시 진위면 하북리 남단에서 오산천과 합류하여 서남으로 유한다. 또한 진위A 단위구역을 구성하고 있는 시군은 총 8개로 수원시(121.05 km²), 군포시(4.17 km²), 용인시(200.7 km²), 화성시(177.35 km²), 안성시(35.77 km²), 오산시(42.77 km²), 평택시(142.42 km²), 의왕시(10.78 km²)가 포함되어 있다.

2.2. 토지계 발생부하량 산정 방법

본 연구에서 토지계 발생부하량 산정은 수질오염총량관리기술지침⁴⁾에 의해 산정하였다. 수질오염총량관리기술지침에서는 토지계 발생부하량에 대한 실측조사가 어려운 경우에는 식 (1)의 방법에 따라 지목별 면적과 연평균 발생부하량 원단위(Table 1)를 이용하여 연평균 발생부하량을 산정할 수 있도록 하고 있다.

$$\text{토지계발생부하량} = \sum(\text{지목별면적} \times \text{지목별연평균발생부하량원단위}) \quad (1)$$

2.3. 3가지 시나리오에 따른 토지계 T-P 발생부하량 산정

지목의 단순화에 따른 토지계 발생부하량의 불확실성을 분석하고 이에 따른 개선된 방법을 제시하고자 본 연구에서는 3가지의 시나리오를 작성하였고 이에 맞는 토지계 T-P 발생부하량을 각각 산정 하였다. 시나리오 1은 기존 수질오염총량관리기술지침에 의해 제시된 5가지 지목(Table 1)을 이용하여 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였고, 시나리오 2는 23개 중분류 토지피복을 이용하여 산정하였으며, 시나리오 3은 토지계 산정 개선방안으로서, 중분류 토지피복을 기존 총량에서 제시하는 28개 지목으로 매칭하여 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였다.

2.3.1. 시나리오 1 : 수질오염총량제 5개 지목 기준

시나리오 1은 기존 수질오염총량제의 기술지침에 의한

Table 1. Unit area load in TMDLs (unit: kg/km²/day)

Land category in TMDL	T-P
Upland	0.24
Paddy	0.61
Forest	0.14
Site area	2.10
Others	0.027

Table 2. 28 land category of serial cadastral map classified into 5

28 land category in serial cadastral map	Land category in TMDL	
Building site	Site area	
Gas station, Warehouse		
Factory site		
Amusement park		
Physical site (not including golf course site)		
Parking lot, Load, railroad site		
School site, religious site, Historical site, Water supply site		
Paddy		Paddy
Upland		Upland
Orchard		Upland
Forest	Forest	
Golf course site	Others	
Pasture, Cemetery, Park		
Salt pond, Miscellaneous land, Mineral spring site, Bank, River, Water way, Reservoir, Fishery		

토지계 T-P 발생부하량을 산정해야 하므로, 먼저 진위A 단위구역에 속하는 시군을 구분하고 이에 속하는 2007년부터 2010년까지의 지적도 28개 지목별 면적 현황 자료를 수질오염총량관리기술지침에 제시한 5개의 지목으로 재분류(Table 2)하여 식 (1) 방법에 따라 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였다.

2.3.2. 시나리오 2 : 중분류 토지피복기준

우리나라의 토지피복 자료는 환경부 EGIS에서 GIS 공간정보로 제공하고 있는 대분류, 중분류, 세분류별 토지피복자료가 있고, 국토해양부에서 매년 업데이트 하여 제공하고 있는 지적도기반 28개 지목별 공간자료 등이 있으며, 우리나라 수질오염총량제에서는 매년 업데이트되는 지적도 기반 28개 지목 자료를 5개 지목으로 재분류 한 후 토지계 발생부하량을 산정하고 있다.

현재 환경부는 이를 보완하기 위해 중분류 토지피복을 기본으로 한 비점장기유출모니터링사업을 2007년부터 수행해 오고 있으며, 국내외 다양한 수질항목별 EMC와 토지피복별 비점 발생부하 원단위 산정과 같은 연구 결과들이 활발히 발표되고 있다.^{7,14-21)}

따라서 시나리오 2에서는 이러한 국내외 원단위 연구결과 중 교통지역에 대한 원단위는 Kang⁷⁾에서 연구한 결과를 이용하고, 주거지역, 공공시설지역은 Lee²¹⁾의 연구결과를 이용하였으며, 그 외 상업지역 등 9개 토지피복에 대한 원단위는 Kweon¹⁵⁾에서 연구한 원단위 결과를 사용하였다.

하지만 기타 나지, 자연초지등 5개 토지피복에 대한 원단위 결과는 기존 연구된 원단위 결과가 존재하지 않아 기존 수질오염총량제 기타 지목에 대한 원단위 값을 인용하였고 (Table 3), 이러한 원단위 결과들을 이용하여 시나리오 1에서

Table 3. Result of unit area load of total phosphorus by land cover map in 2007 (unit : kg/km²·day)

Level II land cover	Unit area load (T-P)	Reference
Residential area	0.63	Lee et al. ²¹⁾
Commercial area	0.55	
Manufacturing area	0.46	Kweon ¹⁵⁾
Recreational facility area	0.84	
Traffic area	1.40	Kang et al. ⁷⁾
Regional public facility area	1.05	Lee et al. ²¹⁾
Paddy	0.50	
Upland	0.53	
Orchard	0.17	
Coniferous, broad-leaved, Mixed stand forest	0.03	Kweon ¹⁵⁾
Golf course site	0.92	
Artificial pasture	0.12	
Ground, Natural pasture, Other plantations, Inland waters, Inland wetland	0.027	National institute of environmental Research ⁴⁾

고려하지 못한 다양한 지목까지 세분화된 2007년 진위A 단위구역의 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였다.

2.3.3. 시나리오 3 : 기존방법 개선방안(28개 지목으로 확장)

우리나라 수질오염총량제 관리지역에서 매년 이루어지는 이행평가에서는 매년 토지계 발생부하량을 산정해야 하며, 이를 위해 매해 변화하는 토지계의 지목별 면적 현황 기초자료가 필요하기 때문에 매해 업데이트 되지 않는 중분류 토지피복 자료는 수질오염총량제에 그대로 반영하여 사용하기 어렵다.

따라서 시나리오 2에서 제안한 중분류 토지피복분류별 원단위를 수질오염총량제에서 효과적으로 사용할 수 있도록 23개 중분류 토지피복을 수질오염총량제에서 사용하고 있는 지적도 기반 28개 지목에 매칭하였으며, 조사되지 않은

지목에 대해서는 기존 수질오염총량제 원단위를 그대로 매칭하였고(Table 4), 이를 이용하여 2007년부터 2010년까지 5개에서 13개로 지목이 확장된 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였다.

2.4. 개선된 토지계 발생부하량 산정방법(시나리오3)의 검증

본 연구에서는 개선된 토지계 발생부하량 산정방법(시나리오3)의 정확도를 검증하기 위해 공간적으로 유출량과 비점오염부하량을 예측할 수 있으며 입력자료 구축 및 모형구동이 간단하면서 예측율이 높은 L-THIA 모형을 선택하였다.

L-THIA는 미국 퍼듀대학교에서 개발된 분포형 모델로 유출곡선식(Curve Number, CN)과 토지이용별 유량가중평균농도(Event Mean Concentrations, EMCs)에 의해 유출량과 비점오염부하량을 계산한다.²²⁾ 또한 5일 선행함수조건(Antecedent Moisture Concentration, AMC)을 고려하여 AMC I(건기), AMC II(평균), AMC III(포화) 조건에 따른 CN값을 조절하여 유출량을 계산한다(Fig 2).²³⁾

2.4.1. L-THIA모형의 입력자료

L-THIA 모형은 입력 자료가 매우 간단한 모형으로서 일강수자료와 토지이용도 및 토양도를 구축해야 한다.

따라서 본 연구에서는 ArcGIS 9.3 프로그램 이용하여 진위A 단위구역의 진위A0404 세유역 내에 위치해 있는 동연교 수위관측소를 기준으로 유역을 분할하였고, 이에 따른 토지이용도와 토양도를 구축하였으며(Fig. 3), 토지이용도와 토양도를 교차시켜 수문학적반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU Map)도를 구축한 후 문헌연구²⁴⁾를 통해 CN값을 부여하였다.

또한 일강수자료 구축을 위해 전국 기상청 기상지점 티센망에 따라 이천기상관측소와 수원기상관측소의 2010년 일강우 관측 자료를 기상 입력 자료로 활용하였고, 모형의 보

Table 4. Matching of land cover map and 28 land category (unit: kg/km²·day)

28 land category in serial cadastral map	Level II land cover	Unit area load (T-P)	Reference
Building site	Residential area	0.63	Lee et al. ²¹⁾
Gas station, Warehouse	Commercial area	0.55	
Factory site	Manufacturing area	0.46	Kweon ¹⁵⁾
Amusement park, Physical site	Recreational facility area	0.84	
Parking lot, Load, railroad site	Traffic area	1.40	Kang et al. ⁷⁾
School site, Religious site, Historical site, Water supply site	Regional public facility area	1.05	Lee et al. ²¹⁾
Paddy	Paddy	0.50	
Upland	Upland	0.53	
Orchard	Orchard	0.17	Kweon ¹⁵⁾
Forest	Coniferous, Broad-leaved, Mixed stand forest	0.03	
Pasture, Cemetery, Park	Artificial pasture	0.12	
Salt pond, Miscellaneous land, Mineral spring site, Bank, River, Water way, Reservoir, Fishery	Ground, Natural pasture, Other plantations, Inland waters, Inland wetland	0.027	National Institute of environmental research ⁴⁾

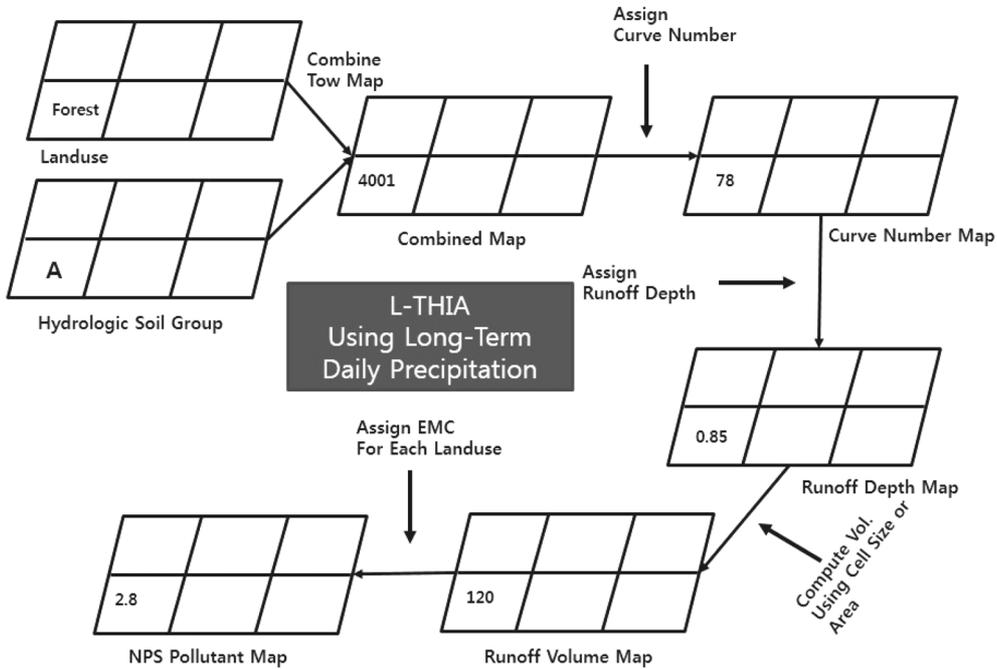


Fig. 2. Overview of L-THIA.¹³⁾

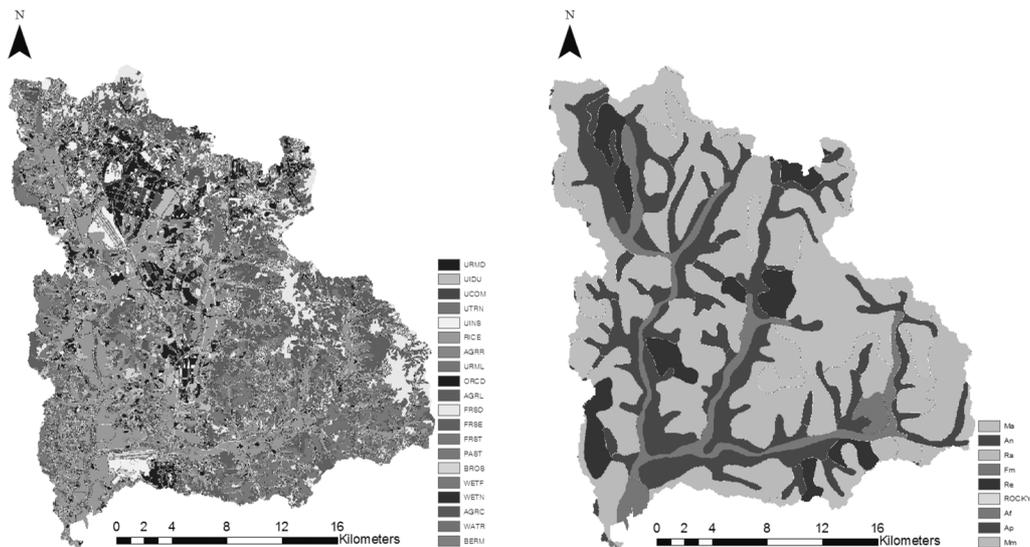


Fig. 3. Land cover and soil map.

정을 위한 일유량자료는 WAMIS를 통해 동연교 수위 관측소의 2010년 수위 관측 자료를 이용하여 구축하였다.

2.4.2. L-THIA모형의 CN보정 및 토지계 발생부하량 산정

L-THIA 모형은 기저유출을 제외한 직접유출량만을 산정하기 때문에 모형 매개변수 보정에 필요한 직접유출량 자료를 추가로 구축해야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 이유로 직접유출량 자료 구축을 위해 Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) system을 이용하여 동연교 수위 관측소의 일 유량자료를 직접유출과 기저유출로 유출량을 분리하고, WHAT system의 직접유출 결과자료를 이용하여 L-THIA 모형 매개변수 보정

자료로 활용하였다.

L-THIA 모형의 매개변수(Curve Number, CN) 보정에는 사용자의 주관적인 측면을 제거하고, 일관성 있는 보정이 이루어지도록 SCE-UA알고리즘을 이용하였다. SCE-UA 알고리즘은 최적해 탐색을 위해 각 매개변수의 논리적 범위(최소/최대) 내에서 무작위 표본 추출을 통해 하나의 모집단(population)을 구성하고, 모집단을 p개의 집합체(complex)로 분할한다. 각 집합체는 simplex 알고리즘을 이용하여 p개의 집합체를 개별적으로 진화시켜, 주기적으로 혼합(shuffling), 새로운 집합체를 형성하고, 최종적으로 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 수행되어 매개변수의 논리적 범위 내에서 최적해를 선정하게 된다(Fig. 4).

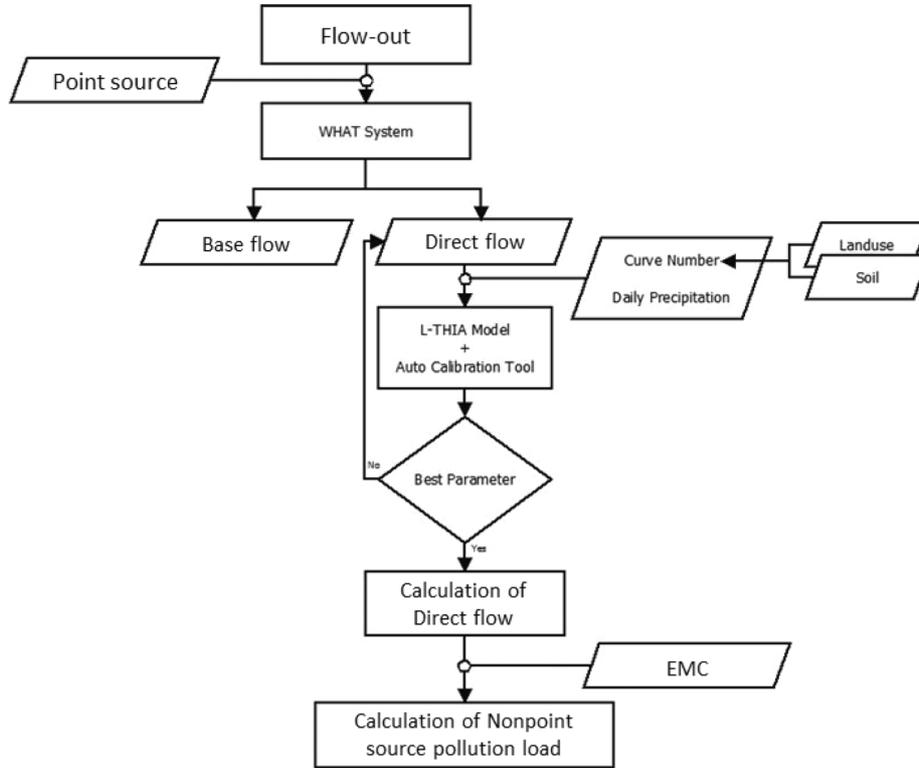


Fig. 4. Overview of Auto-calibration module in L-THIA.

따라서 위의 과정을 통한 모형의 매개변수 보정이 끝난 후 최적화 알고리즘을 이용하여 산정된 진위A 단위유역 최적 매개변수를 이용하여 산정한 직접유출량 자료와 Jang²⁵⁾의 연구에서 사용한 환경부 주요 비점오염원 장기유출모니터링 사업의 연차별 결과 중 토지피복별/강우계급별 T-P의 EMC 자료를 활용하여 비점오염부하량을 산정하였다. Jang²⁵⁾에서 사용한 EMC 자료는 현재 최종 확정된 EMC 결과자료는 아니지만 전국 4대강 수계를 대상으로 한 17개 중분류 단일 토지피복에 대해 모니터링을 한 자료이며 2007년부터 진행되고 있는 장기적인 모니터링 자료이기 때문에 본 연구의 토지이용별 EMC 자료에 적용하였다. 하지만 향후 EMC 자료가 확정된다면 확정된 EMC에 대해 L-THIA모형의 재검증이 필요할 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시나리오별 토지계 발생부하량 산정 결과

본 연구에서는 3가지 토지계 발생부하량 산정 시나리오를 작성하였으며 이에 따라 각각 진위A 단위유역의 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였고 그 결과는 아래와 같다.

3.1.1. 시나리오 1의 결과 : 수질오염총량제 5개 지목 기준

기존의 수질오염총량제 기술지침⁴⁾에 의해 제시된 지적도 기반 5개 지목(전, 답, 임야, 대지, 기타)에 의해 산정된 년도별 진위A 단위유역 토지계 T-P 발생부하량은 Table 5와 같다.

산정결과, 2007년부터 2010년까지 전, 답, 임야의 발생부하량은 감소하는 반면 대지와 기타에 의한 토지계 T-P 발생부하량은 증가 하였으며, 특히 대지는 2010년에 2007년 대비 약 21.6% 이상 증가 한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 수질오염총량제의 토지계 발생부하량 산정 중 대지에 의한 발생량 부분이 전체 토지계 발생부하량에서 많은 비중을 차지하고 있는 것을 나타내며 대지 발생부하량 산정의 불확실성이 높을수록 전체 토지계 발생부하량 산정의 정확도는 많이 떨어질 수 있다는 것을 의미한다.

Table 5. Result of pollutant load of total phosphorus (Scenario 1)

Year	Paddy		Upland		Forest		Site area		Others		Total
	kg/day	%	kg/day	%	kg/day	%	kg/day	%	kg/day	%	
2007	17.2	3.6	94.3	19.7	39.5	8.3	325.3	68.0	2.2	0.5	478.5
2008	16.8	3.4	91.1	18.6	37.4	7.6	342.0	69.9	2.2	0.5	489.6
2009	16.7	3.3	90.1	18.1	37.0	7.4	351.8	70.7	2.2	0.4	497.8
2010	16.4	3.3	88.6	17.6	36.4	7.2	359.2	71.4	2.2	0.4	502.8

Table 6. Result of pollutant load of Total phosphorus (Scenario 2)

Level II land cover	T-P load (kg/day)	Ratio (%)
Golf course site	7.45	0.9
Regional public facility area	14.56	4.9
Manufacturing area	14.51	3.7
Orchard	0.90	0.6
Traffic area	28.25	2.4
Ground	2.48	2.4
Other plantations	3.41	0.8
Artificial pasture	0.91	0.9
Inland waters	0.78	3.4
Inland wetland	0.12	0.5
Paddy	106.75	25.0
Upland	33.53	7.4
Commercial area	7.16	1.5
Recreational facility area	3.45	0.4
Natural pasture	0.72	0.7
Residential area	59.69	11.1
Mining site	0.00	0.0
Coniferous forest	4.10	16.0
Plastic house	0.03	0.0
Mixed stand forest	2.34	9.1
Broad-leaved forest	2.13	8.3
Total	293.27	100

3.1.2. 시나리오 2의 결과 : 중분류 토지피복기준

환경부 2007년 토지피복자료와 중분류별 원단위 자료를 이용하여 중분류 토지피복별 진위A 단위구역의 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였다. 산정 방식은 수질오염총량제 기술지침 방법을 따랐으며 그 결과는 Table 6과 같다.

산정결과, 진위A 단위구역에서는 논과 공업지역, 주거지

역의 토지계 T-P 발생부하량이 높은 것으로 나타났으며, 수질오염총량제 5가지 지목중 대지에 속하는 주거지역, 공업지역, 공공시설지역, 교통지역, 위락시설지역, 상업지역의 경우 각 부하량 편차가 3.45 kg/day~56.69 kg/day로 약 16배까지 차이가 있는 것으로 나타났다.

특히 상업지역과 교통지역인 경우는 수질오염총량제에서의 분류상 같은 대지로서 2007년 토지피복기준 면적은 상업지역이 1.5배 더 크지만, 토지계 T-P 발생부하량에서는 오히려 교통지역이 약 1.2배 더 큰 것으로 나타났고(Fig. 5), 공공시설지역과 공업지역 면적은 공공시설지역의 면적이 1.3배 크지만 각각의 T-P 발생부하량 차이는 0.05 kg/day밖에 차이가 안 나도록 산정되었다. 이와 같은 결과는 수질오염총량제 5개 지목 내에서 같은 지목일 경우도 원단위 차이로 인해 토지계 발생부하량 차이가 발생할 수 있다는 것을 나타낸다.

3.1.3. 시나리오 3의 결과 : 기존방법 개선방안(28개 지목으로 확장)

본 연구의 시나리오 2의 결과를 토대로 중분류 토지피복 분류별 원단위를 수질오염총량제에 바로 적용한다면 토지계 발생부하량 산정의 불확실성을 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대 되지만 현실적으로 수질오염총량제에서는 1년 단위로 계획들이 수립되고 이행평가가 이뤄지기 때문에 매해 업데이트가 되지 않는 중분류 토지피복자료는 적용하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 중분류 토지피복분류별 원단위를 수질오염총량제에 적용할 수 있도록 중분류 토지피복과 기존 수질오염총량제에서 사용하고 있는 지적도 기반 28개 지목을 매칭하였으며 이를 이용하여 진위A 단위구역 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였다 (Table 7).

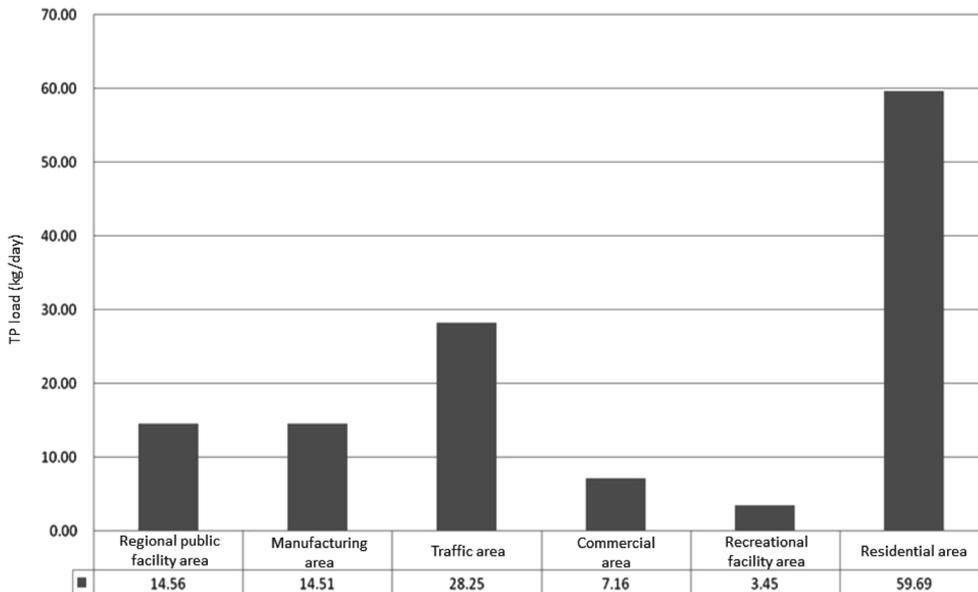


Fig. 5. 5 land cover pollutant load of total phosphorus in site area (kg/day).

Table 7. Result of pollutant load of Total phosphorus (Scenario 3)

TMDL	28 land category in serial cadastral map	2007		2008		2009		2010	
		Scenario1	Scenario3	Scenario1	Scenario3	Scenario1	Scenario3	Scenario1	Scenario3
Upland	Building site		40,66		43,42		44,60		45,53
	Gas station, Warehouse		1,09		1,21		1,29		1,34
	factory site		10,27		10,95		11,19		11,56
	Amusement park, Physical site	325,3	14,12	342,0	13,09	351,8	13,11	359,2	13,18
	Parking lot, Load, railroad site		57,65		61,03		62,78		63,99
	School site, religious site, Historical site, Water supply site		9,28		9,98		10,87		11,07
Paddy	Paddy	94,3	77,31	91,1	74,71	90,1	73,83	88,6	72,60
Forest	Upland		37,32		36,41		36,10		35,49
	Orchard	17,2	0,21	16,8	0,22	16,7	0,22	16,4	0,22
Site area	Forest	39,5	8,46	37,4	8,02	37,0	7,94	36,4	7,80
Others	Pasture, Cemetery, Park		1,32		1,59		1,65		1,71
	Salt pond, Miscellaneous land, Mineral spring site, Bank, River, Water way, Reservoir, Fishery	2,2	1,87	2,2	1,84	2,2	1,83	2,2	1,83
	Total	478,50	259,55	489,50	262,48	497,8	265,43	502,8	266,34

산정결과, 수질오염총량제 5개 지목 기준 대지의 경우 2007년 T-P 발생부하량 차이가 1.09~57.65 kg/day, 2008년에는 1.21~61.03 kg/day, 2009년에는 1.29~62.78 kg/day, 2010년에는 1.34~63.99 kg/day까지 있는 것으로 나타났으며 각각 약 10배 정도의 차이를 보였다. 또한 수질오염총량제 5개 지목 기준 전의 경우도 2007년 기준 T-P 발생부하량 차이가 0.21~37.32 kg/day, 2008년에는 0.2~36.41 kg/day, 2009년에는 0.22~36.10 kg/day, 2010년에는 0.22~35.49 kg/day까지 있었으며 각각 약 177배 정도의 차이를 나타냈다.

또한 시나리오 1과 시나리오 3의 결과를 비교하였을 때, 2007년 기준 대지의 경우 각각 325.3 kg/day, 133.05 kg/day로 시나리오 1의 결과가 약 2.5배 큰 것으로 나타났고, 2008년부터 2010년까지의 결과에서도 이와 비슷한 경향을 나타냈다. 이와 반대로 2007년부터 2010년까지 전의 경우 시나리오 3의 결과가 시나리오 1의 결과 보다 약 2배 더 큰 것으로 나타났다.

이와 같은 경향은 지목을 단순화하였을 경우 다양한 지목에 의한 발생부하량의 차이를 고려하지 못하기 때문에 토지계 발생부하량 산정에 있어 불확실성이 존재할 수 있다는 것을 나타낸다.

따라서 지목을 좀 더 세분화한 개선된 방식(시나리오 3)이 다양한 지목에 의한 영향을 고려할 수 있기 때문에 기존 수

Table 8. Comparing of scenario 1, 2, 3 and L-THIA

Year	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	L-THIA
2007	478.50	293.27	259.55	-
2010	502.80	-	266.34	222.08

질오염총량제 토지계 발생부하량 산정방식(시나리오 1)보다는 토지계 발생부하량의 불확실성을 줄여 줄 수 있는 것으로 판단된다.

또한 진위A 단위유역보다 더 크고 대지 내 비율이 더욱 많이 혼재되어 있는 단위유역일 경우 본 연구에서 산정한 토지계 T-P 발생부하량 차이보다 더 많은 차이가 날 수 있을 것이라 판단된다.

3.2. L-THIA모형의 토지계 발생부하량 결과

본 연구에서는 개선된 토지계 발생부하량 산정 방식(시나리오 3)의 정확도를 검증해 보기 위해 L-THIA모형을 이용하여 토지계 T-P 발생부하량을 산정하였고 시나리오 3의 결과와 비교하였다.

3.2.1. 직접유출량 산정 및 CN보정 결과

WHAT system을 이용하여 2010년 동연교 수위관측소의 일유량자료를 직접/기저유출로 분리할 결과 이 기간의 총유량

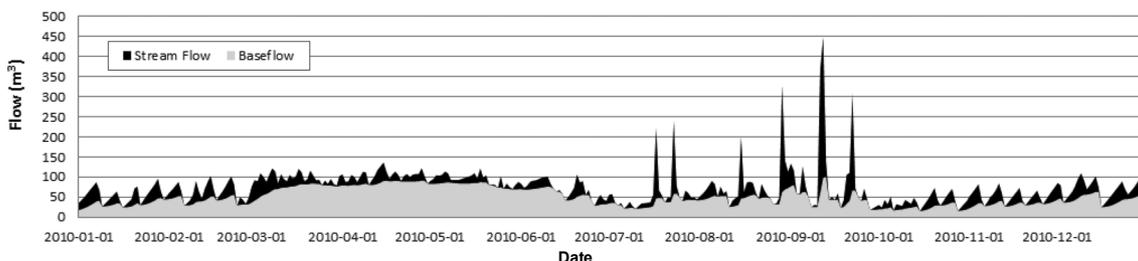


Fig. 6. Graph of base-flow separation using WHAT system in Jinwi A.

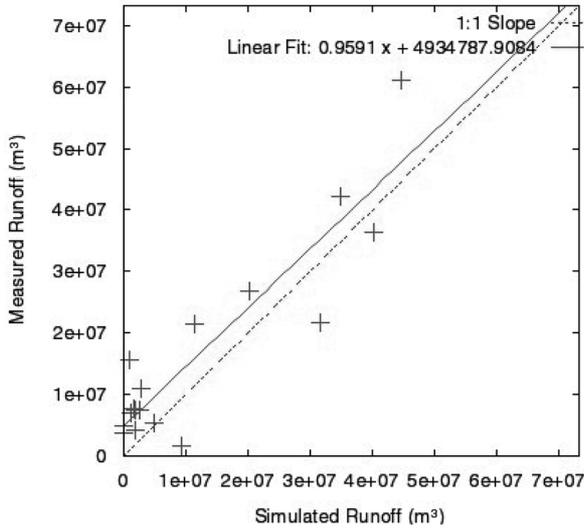


Fig. 7. Result of flow calibration in Dongyeon bridge.

26,541 m³ 중 기저유출량 18,218 m³ 직접유출량 8,323 m³ 으로 기저유출의 기여율이 큰 것으로 나타났다(Fig. 6).

동연교 수위관측소를 기준으로 유역분할 후 해당 유역의 토지이용도와 토양도 조합(Hydrological Response Unit, HRU)을 결정한 결과 총 85개의 HRUs 및 Curve Number (CN)를 도출하였고 도출된 85개 CN에 대하여 L-THIA 모형의 자동보정 기법을 통해 최적 매개변수(CN)를 산정한 결과 WHAT system을 통해 산정된 직접유출량과의 유효지수는 $NSE = 0.7$, $R^2 = 0.8$ 로 높은 상관성을 보였다(Fig. 7).

Ramanarayanan²⁶⁾은 적용성 평가에서 R^2 0.5 이상, NSE 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제시하였으며, Donigian²⁷⁾은 NSE 0.7 이상에서 모형의 효율범위와 신뢰구간이 높다고 제시하였다.

3.2.2. L-THIA 오염부하량 산정결과 및 검증결과

보정된 L-THIA를 이용하여 진위A 단위유역의 T-P 발생부하량을 산정한 결과, 222.08 kg/day로 산정되었다(Fig. 8). 또한 이 결과를 시나리오 1과 시나리오 3의 결과와 비교하였고, 시나리오 3의 197.84 kg/day T-P 발생부하량 결과가 시나리오 1에 비해 L-THIA로 산정된 T-P 발생부하량과 가장

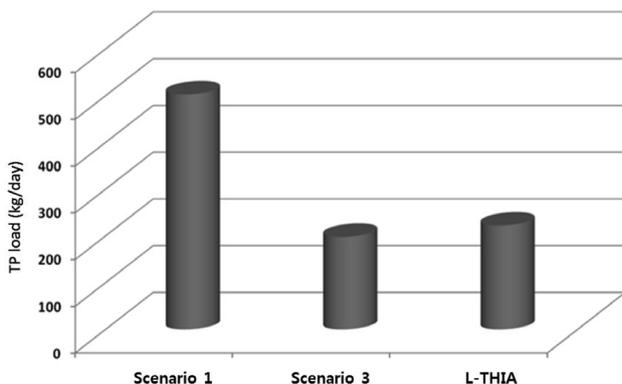


Fig. 8. Comparing of scenario 1,2 and L-THIA result.

적은 편차를 나타냈다.

본 연구에서는 L-THIA만을 이용하여 T-P 발생부하량을 산정하였고 개선된 토지계 발생부하량 산정 방식의 검증 결과가 우수하게 나타났지만 향후 SWAT이나 HSPF와 같은 중분포 모형들을 이용하여 본 연구에서 제시한 개선된 토지계 발생부하량 산정방식을 보다 더 다양하게 검증할 필요성이 있다고 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 우리나라 수질오염총량제 토지계 발생부하량 산정방식 중 지목 단순화로 인한 불확실성을 분석하고 23개 중분류 토지피복도를 기존 산정방식에 적용하여 지목확장을 할 수 있도록 개선하였으며 L-THIA모형을 통해 개선된 방식의 결과를 검증하였다.

1) 지목의 단순화로 인한 토지계 산정방식의 불확실성이 높다는 것이 나타났으며 특히 시나리오 2의 결과와 같이 수질오염총량제 분류상 같은 대지일 경우에도 각 부하량 편차가 약 16배까지 차이가 있는 것으로 나타났다.

2) 또한 본 연구에서 개선된 방식으로 제안한 시나리오 3과 시나리오 1의 비교 결과, 지목의 단순화로 인한 차이가 대지일 경우 약 2.5배 차이가 났고 전의 경우에도 약 2배 정도 차이를 나타냈으며 이러한 불확실성 차이는 진위A 단위유역보다 더 크고 다양한 토지피복이 혼재되어 있을 경우 더욱 더 크게 나타날 것으로 판단된다.

3) 이와 더불어 개선된 방식으로 산정한 토지계 T-P 발생부하량과 L-THIA 모형의 결과 차이는 모형 예측 대비 10% 정도의 차이로 매우 적게 나타났기 때문에 개선된 방식(시나리오 3)은 기존 방식(시나리오 1)보다 토지계 발생부하량 산정의 정확성을 보다 더 높일 수 있을 것이라 판단되며 본 연구 결과는 향후 수질오염총량제의 토지계 발생부하량 산정의 정확도를 높이는 데 있어 기초자료로 사용될 수 있을 것이라 기대된다.

4) 또한 본 연구에서 제안한 지목세분화에 의한 토지계 발생부하량 산정 방법은 향후 수질오염총량제에서 다양한 지목에 의한 비점오염원 저감시설을 적용할 경우 비점오염원 삭감대상량을 보다 더 정확히 예측할 수 있고 이에 따라 비점오염원 저감량 산정의 정확도를 높일 수 있을 것이라 판단된다.

5) 하지만 본 연구에서 사용한 중분류 토지피복별 T-P 발생부하 원단위는 여러 연구 결과들을 인용하여 적용한 값이기 때문에 향후 환경부에서 수행하고 있는 토지계 발생부하 원단위 산정 사업으로 산출되는 더 정확한 원단위를 이용하여 지목 세분화에 따른 불확실성 감소에 대해 재검증할 필요가 있다고 판단된다.

Reference

- Park, J. H., Park, J. D., Rhew, D. H. and Jung, D. I., "Performance Appraisal of Total Maximum Daily Loads: Performance on Development/Reduction Plan and Water Quality Status of Unit Watershed," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **25**(4), 481~493(2009).
- Park, J. D., Choi, O. Y. and Oh, S. Y., "Characterization on the Pollution Discharge Load at the Unit Watershed for the management of Total Maximum Daily Loads-in Guem River Basin," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **28**(6), 786~795(2012).
- Lee, Y. G., "Analysis and Countermeasure on TMDLs for Sustainable Creating a Water Environment," Gyeongnam Development Institute, pp. 4~5(2013).
- National Institute of Environmental Research, "Technical guidelines for TMDLs," 11-1480523-001067-01(2012).
- Choi, J. Y. and Shin, C. M., "Management of Nonpoint Pollution by Reducing Storm Runoff," RE03, pp. 79~83(2002).
- Park, J. B., Kang, D. K. Kal, B. S. Yoon, Y. S. and Lee, J. G., "Literature survey, Modeling by Measured unit load Quality Assurance," in Proceeding of the 2011 Spring Conference of the Korea Water Resources Association, KWRA, Daegu, pp. 284~288(2011).
- Kang, H. M., Lee, D. and Bae, W., "Analysis of Unit Pollution Load on Highway runoff," *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **26**(1), 55~68(2012).
- Lee, B. Y., Lee, C. H., Lee, D. H. and Lee, S. W., "Unit-load Method for the Estimation of Non-point Pollution Loads by Subcategorizing the Land-use Category Reflected in the National a Land Register Data: A Case Study of Kyeongan Watershed in South Korea," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **26**(4), 598~607(2010).
- Kim, J. H. and Kweon, Y. W. "The Subdivision Method of Land Category According to Commercial Land Use for Building Site," *J. Kor. Cadastre Informat. Assoc.*, **12**(1), 129~137(2010).
- Kim, J. J., Kim, T. D., Choi, D. H., Lim, K. J., Engel, B. and Jeon, J. H., "L-THIA Modification and SCE-UA Application for Spatial Analysis of Nonpoint Source Pollution at Gumho River Basin," *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **25**(2), 311~321(2009).
- Engel, B., "L-THIA NPS (Long Term Hydrologic Impact Assessment and NonPoint Source Pollutant Model, Version 2.1 A)," Purdue University and US Environmental Protection Agency(2001).
- Jung, J. W., Yoon, K. S., Choi, W. J., Choi, W. Y., Joo, S. H., Lim, S. S., Kawk, J. H., Lee, S. H., Kim, D. H. and Chang, N. I., "Improvement Measures of Pollutants Unit-Loads Estimation for Paddy Fields," *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **24**(3), 291~296(2008).
- Lim, K. J., Engel, B., Kim, Y. S., Choi, J. D. and Kim, K. S., "L-THIA-NPS to Assess the Impacts of Urbanization on Estimated Runoff and NPS Pollution," *J. Kor. Soc. Agric. Eng.*, **45**(4), 63~73(2003).
- Choi, J. Y., Lee, S. Y. and Kim, L. H., "Wash-off Characteristics of NPS Pollutants from Forest Landuse," *J. Kor. Soc. Hazard. Mitigat.*, **9**(4), 129~134(2009).
- Kweon H. K., "Quantitative assessment of nonpoint source load by applying watershed model andl level-2ILand cover map," Kyungpook University, The degree of Doctor of Philosophy, pp. 101~113(2011).
- Choi, J. W., Ryu, J. C., Kim, I. J. and Lim, K. J., "Evaluation of Runoff Peak Rate Runoff and Sediment Yield under Various Rainfall Intensities and Patterns Using WEPP Watershed Model," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **45**(8), 795~804(2012).
- Choi, D., Jung, J., Yoon, K., Lee, K., Choi, W., Lim, S., Park, H., Yim, B. and Hwang, T., "Estimation of TOC Concentration using BOD, COD, in Runoff from Paddy Fields," *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **27**(6), 868~876(2012).
- Shin, M., Choi, J., Choi, Y., Park, W., Won, C., Shin, D., Lim, K. J. and Choi, J., "Runoff Characteristics of Non-Point Source Pollutant Loads Generated on Golf Course," *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **27**(6), 784~793(2011).
- Lee, J. H., Park, S., Kim, D., Lee, Y. J. and Park, M. J., "Long-term Monitoring and Analysis for Discharge Characteristics of Nonpoint Source Pollution by Land Use Types in Gem River Basin," *J. Kor. Soc. Hazard. Mitigat.*, **12**(6), 343~350(2012).
- Park, B. K., Ryu, J., Park, M., Kim, Y. S. and Ryu, D. H., "Revision of Basic Unit of Land Source Pollutant in Relation to LID and Green Stormwater Infrastructure Industry," in Proceeding of the 2013 Autumn Forum of the Korean Society of Water and Wastewater, Seoul, p. 9(2013).
- Lee, H. P., Yoon, C. G., Lee, S. J., Choi, J. H. and Son, Y. K., "Analysis of Nonpoint Source Pollution Runoff from Urban Land Uses in South Korea," *Environ. Eng. Res.*, **17**(1), 1~10(2012).
- Jeon, J. H., "Analysis of Spatical Distribution of Surface Runoff in Seoul City using L-THIA: Case Study on Event at July 27, 2011," *J. Kor. Soc. Agric. Eng.*, **53**(6), 171~183(2011).
- Jeon, J. H., Kim, T., Choi, D., "Regionalization of CN values at Imha Watershed with SCE-UA," *J. Kor. Soc. Agric. Eng.*, **53**(5), 9~16(2011).
- Lee, J. S., Hydrology, Gumiseogwan, Seoul, pp. 329~347(2008).
- Jang, C., Kum, D., Ha, J., Kim, K. S., Kang, D. H., Kim, K. T., Shin, D. S. and Lim, K. J., "Evaluation of Runoff and Pollutant Loads using L-THIA 2012 Runoff and Pollutant Auto-calibration Module and Ranking of Pollutant Loads Potential," *J. Kor. Soc. Water Waste.*, **29**(2), 184~195(2012).
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M. and McFarland, A. M. S., "Using APEX to identify alternative practices for animal waste management," ASAE International Meeting, Minneapolis, MN., pp. 97~2209(1997).
- Donigian, Jr., A. S., HSPT Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19, Calibration and Verification Issues. Presented and Prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.(2000).