

## 농업 소유역 격자단위 오염부하량 평가

### Assessment of Cell Based Pollutant Loadings in an Intensive Agricultural Watershed

강문성\* · 조재필\*\*† · 전종안\*\*\* · 박승우\*

Kang, Moon Seong\* · Cho, Jae Pil\*\*† · Chun, Jong An\*\*\* · Park, Seung Woo\*

#### ABSTRACT

The objectives of this paper were to estimate cell based pollutant loadings for total maximum daily load (TMDL) programs and to evaluate the applicability of the agricultural nonpoint source (AGNPS) model for an intensive agricultural watershed in Korea. The model was calibrated and validated at a watershed of 384.8 ha of drainage area using the observed data from 1996 through 2000 in terms of runoff, suspended solid, total nitrogen, and total phosphorus on a hourly basis. Analysis of spatial variations of pollutant loadings for rainfall frequencies of various intensities and durations were conducted. In addition, the validated model was applied to estimated the TMDL removal efficiency for best management practices (BMPs) scenarios which were selected by taking into account the pollutant characteristics of the study watershed. The model can help to understand the problems and to find solutions through landuse changes and BMPs. Thus, the method used for this study was able to identify TMDL quantitatively as well as qualitatively for various sources pollution that are spatially dispersed. Also it provides an assessment of the impact of BMPs on the water bodies studied, allowing the TMDL programs to be complemented more effectively.

**Keywords:** AGNPS model; pollutant loading; TMDL; BMPs

#### 1. 서 론

오염총량관리는 수질기준을 만족시키기 위해 수체에서 받아들일 수 있는 수질 항목별 오염부하량의 최대치를 계산하여 삭감량을 산정한 후 유역별로 할당하는 것이다 (Novotny and Olem, 1994; USEPA, 1999; NIER, 2007; Kang, 2002).

미국에서는 이미 1987년 이후부터 수질법 (Water Quality Act)과 청수법 (Clean Water Act)에 의거하여 모든 비점원오염을 대상으로 실시 가능한 최선의 배수처리기술 수준에 대응하는 배수규제를 본격적으로 실시하고 있다 (Kang et al., 2003).

미국환경보호청의 1996년도 조사에 의하면, 지난 25년간 공장 배수와 도시하수 처리에 천문학적 투자를 했음에도 불구하고 수질개선에 많은 문제가 있음을 인정하고, 이에 대한 가장 큰 원인으로 비점원오염을 효과적으로 대처하지 못했기 때문인 것으로 보고하였다.

우리나라에서는 상수원 수질 개선을 위하여 1998년 처음으로 오염총량관리제도를 포함한 한강수계에 대한 수질관리 특별 종합대책을 수립하여 1999년 “한강수계상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률”을 제정하고 시행하고 있다. 또한, 우리나라의 비점오염관리는 ‘95년 전국비점오염원 조사에서 수질 오염원으로 기여율이 산정된 이후 관심을 갖게 되었고, 본격적인 비점오염원 대책은 2004년 정부 합동으로 2020년 까지 비점오염원 관리를 포함하는 ‘4대강 비점오염원관리종합대책’이 국가의 비점오염원 관리대책으로 제시되었다 (NIER, 2007).

한편, NIER (2007)은 비점오염원이 수질오염에 기여하는 비율이 총질소와 부유물질은 50 %에 달하며, BOD (Biochemical Oxygen Demand)와 총인도 20-30 % 수준인 것으로 보고하고 있다. 또한, 비점오염원의 기여율은 점오염원 처리율이 향

\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸임연구원

\*\* USDA-ARS, Northwest Watershed Research Center, Boise, ID 83712, USA

\*\*\* USDA-ARS Crop Systems and Global Change Lab, Beltsville, MD 20705, USA

† Corresponding author. Tel.: +1-208-608-8548

E-mail address: jaepil.cho@ars.usda.gov

2009년 8월 19일 투고

2009년 9월 15일 심사완료

2009년 9월 25일 게재확정

상될수록 더욱 증가할 것으로 추정하고 있다. 따라서, 점오염원 처리가 일정 부분 이루어진 상태에서의 효율적인 수질관리를 위해서는 비점오염원의 적절한 관리가 필요하다.

오염총량관리는 비점오염원모형 (NPS pollution model)과 같은 수질 예측 모델링 기법을 이용하여 추정 및 평가가 가능하다 (Kang, 2002; Kang et al., 2003). 비점오염원모형은 포장이나 유역에서 오염물질의 운송기작을 수학적 관계를 이용하여 정량적으로 추정하는 도구이다 (Novotny and Olem, 1994; Park, 2006). 다양한 유역 규모에서의 수많은 비점오염원 모형들이 광범위한 수질문제에 대한 해결책을 제시하기 위하여 사용되고 개발되어져 왔다. 유역에서의 비점오염원 모형의 적용은 사용목적에 따라 초기 (screening), 중간 (intermediate), 상세 (detail) 계획 수립 단계로 구분할 수 있다. 일반적으로 초기 계획 수립단계는 점오염원과 비점오염원과의 단순 비교 수준에 적용되며, GWLF와 AGNPS 모형은 점오염과 비점오염을 통합적으로 평가할 수 있어 초기 계획 수립단계에 매우 적용성이 높다. HSPF나 SWMM과 같은 모형은 상세 계획 수립 단계 등의 보다 폭넓은 적용이 가능하나, 초기 계획 수립 단계에서의 적용은 수많은 입력자료와 사용자의 전문성을 요구하며, 적절한 입력값과 결과값의 해석이 필요하다 (NIER, 2007; USEPA, 2008; Kang and Kim, 2009).

국내외 많은 연구자들이 비점오염원 모형을 개발하여 시범유역을 대상으로 광범위하게 적용하였고, 오염총량 관리방안 및 최적관리기법 등의 다양한 응용성을 제안하였다. Borah and Bera (2003, 2004), Srivastava et al. (2007), 그리고 USEPA (2008) 등은 주요 수질모형의 종류 및 특징, 적용 및 평가, 그리고 최근 연구동향 및 적용사례를 자세히 정리하여 소개하고 있다. USEPA (2008)에서는 공공성과 사용자의 적용과 사용이 가능한 유역수질모형에 초점을 맞추어 주요 유역 비점오염원모형을 선정하여 추천하고 있다. USEPA (2008)에서 추천하고 있는 주요 비점오염원 모형으로는 AGNPS (Agricultural Non-Point Source), STEPL (Spreadsheet Tool for Estimating Pollutant Load), GWLF (Generalized Watershed Loading Function), HSPF (Hydrologic Simulation Program-FORTRAN), SWMM (Storm Water Management Model), P8-UCM (P8-Urban Catchment Model), 그리고 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 등이 있다. 이러한 비점오염원 모형들 중에서 AGNPS 모형은 유역의 최적관리기법(Best Management Practices, BMPs) 적용에 따른 공간적 수문량 및 오염원량의 변화를 파악하기 위해 적용되는 모형으로 폭우사상에 대한 비점오염원의 위험지역을 구체화하고 최적관리기법의 적용성을 평가할 수 있다는 장점이 있다 (Lee et al., 2007).

본 연구의 목적은 소유역에서의 폭우사상별 격자단위 오염부

하량을 평가하기 위하여, 비점오염원모형을 이용하여 폭우사상에 따른 격자단위의 오염부하량 공간분포 해석을 통한 비점오염원의 잠재적 배출지역을 구체화하고, 비점원 관리를 위한 최적관리기법의 대안을 도출하며, 수문평가지수와 토지이용변화에 따른 비점오염원의 계량화를 실시하고, 그 결과를 평가하는데 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험유역 및 자료구축

소유역에서의 폭우사상별 격자기반의 비점오염원 관리방안을 평가하기 위한 시험유역으로 발안저수지 유역의 HP#6 소유역을 선정하였으며, 유역면적은 385 ha이다. 본 연구에 선정된 시험유역은 경기도 화성시 팔탄면과 봉담읍에 위치하고 있으며, 1996년부터 현재까지 장기적인 수문/수질/생태 모니터링을 실시하고 있는 지역이다.

시험유역에 대한 수문 및 수질 모니터링 및 분석 결과, 도형자료 구축에 대한 내용은 Kang et al. (2003)의 논문에서 상세히 설명하고 있으며, 이를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

#### 가. 수문자료

시험유역인 HP#6 측점의 강우 및 하천수위자료는 강우계와 압력식 수위계를 설치하여 강우량 및 수위를 관측하였다. 폭우시에 유속을 측정하여 수위-유량관계를 결정하고, 이로부터 유량자료를 수집하였다. 직접유출량은 경사급변점법에 의하여 1996년부터 2000년의 자료기간 동안 67개 강우 사상을 대상으로 직접유출량을 추출하였으며, 강우침식성인자는 현장에 설치된 강우계에서 취득한 10분 단위 강우량으로부터 구하였다.

#### 나. 수질자료

시험유역의 오염원은 봉담읍과 팔탄면 사무소의 자료 및 답사를 통하여 인구, 축산, 그리고 산업계를 조사하였다. 수질 샘플링은 매주 정기적으로 수행하였으며, 폭우시에는 수시로 샘플링하였다. 표본의 분석은 pH, DO, 수온 등은 현장에서 측정하였으며, 부유물질, TN, TP 등의 영양물질, 기타 수질 항목 등은 수질 표본으로부터 실험실에서 정량분석을 실시하였다. 시험유역에서의 오염부하량을 측정하기 위해 하천 측점에서 SS, TN, TP에 대한 오염부하량 (L)과 유량 (Q)의 회귀식인 L-Q 식을 구하였다. 시험유역의 L-Q식은 1996년부터 2000년까지 측정된 자료를 이용하였다.

#### 다. 도형자료 구축

도형자료는 ArcView와 위성영상자료에 의하여 추출된 결과를

Table 1 Ranges of sensitivity analysis to the AGNPS model

Item	CN value	Slope (%)	Slope Length (m)	Manning's n	USLE_K	USLE_C	USLE_P	EI <sub>30</sub>
Min.	30	0	10	0.01	0.050	0.0010	0.10	50.53
Max.	100	30	200	1.000	0.500	0.1000	1.00	150.53

바탕으로 AGNPS모형의 입력자료 형태로 변환시키도록 구성하였다. 시험구역의 기본도는 1/5,000 NGIS (National Geographic Information System) 및 RGIS (Rural Geographic Information System) 수치지도와 농촌진흥청의 1/25,000 정밀토양도 (1973)를 이용하여 구축하였으며, 토지피복도는 Landsat-TM 영상 분석 결과로부터 추출하였다. 주제도는 기본도로부터 소유역 경계도, 수계망도, 경사방향도, 경사도 등을 구축하였고, 1/25,000 정밀토양도로부터 수문학적토양군도, 토성, 토양침식성인자도, 작물인자도, 영농보전인자도 등을 구축하였다.

## 2. AGNPS 모형

본 연구에서는 시험구역의 특성과 단일 폭우사상에 대한 오염총량 및 격자단위의 유역관리 해석 및 평가의 수월성을 고려하여 AGNPS 모형을 비점오염원 모형으로 선정하였다. AGNPS 모형은 미국 농무성의 농업연구소 (Agricultural Research Service, ARS)와 미네소타 환경보전국 (Minnesota Pollution Control Agency) 및 토양보전국 (Soil Conservation Service, SCS)에서 통일된 방법으로 농촌구역의 비점오염의 발생원 파악과 이의 억제를 위한 최적관리기법을 적용하기 위한 목적으로 공동 개발된 것으로서, 단일 폭우사상에 대한 분포형 매개변수 모형이다 (Young et al., 1987; Kang, 2002).

AGNPS 모형은 수 acre에서 202.3 km<sup>2</sup> (50,000 acre)의 유역에서 발생하는 폭우사상에 대한 유출과 침투유량, 토양유실, 총질소, 총인, 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD) 등의 비점오염 부하량을 추정하도록 되어 있다. AGNPS 모형의 구조와 이론적 배경, 그리고 국내의 적용성 및 최적관리방안 평가는 Young et al. (1987), Kim (1995), Cho (1998), Chun (2001), Kang et al. (2003), Lee et al. (2007), Foerster and Milne-Home (1995), Fisher et al. (1997), Brannan (1998), Grunwald (1999), Bingner et al. (2008), 그리고 Binger and Theurer (2007) 등의 많은 연구자에 의하여 수행되었다.

본 연구에서는 AGNPS 모형을 이용한 오염총량관리 및 최적관리기법의 적용성 평가를 위하여, Kang et al. (2003)에 의해 개발된 ArcGIS 기반의 GIS (Geographical Information System)-AGNPS 호환 모형을 사용하였다. GIS-AGNPS 호환 모형은 강우분포모형을 고려하여 강우에너지를 연속적으로 산

정함으로써 격자 단위의 연간 폭우사상에 대한 비점오염부하량을 추정할 수 있도록 구성한 것이다. GIS-AGNPS 호환 모형은 크게 GIS 자료 구축, 강우분포모형, AGNPS 모형의 부모형들로 구성되어 있으며, Kang et al. (2003)의 논문에 자세히 서술되어 있다.

## 3. 모형의 민감도 분석

폭우사상별 격자기반의 비점오염원 관리방안을 평가하기 위하여 AGNPS 모형의 주요 매개변수에 대한 예민도 분석을 통해 보정과 검정을 수행하였다.

본 연구에서 선정된 AGNPS 모형의 수문·수질 매개변수는 Table 1에서와 같이 유출곡선번호 (Curve Number, CN), 격자의 경사 (Slope), 경사장 (Slope Length, SL), Manning의 조도계수, 토양침식성인자 (USLE\_K), 작물경작인자 (USLE\_C), 침식조절인자 (USLE\_P), 그리고 강우에너지 (EI<sub>30</sub>)를 선정하였다. 선정된 매개변수의 최소값과 최대값은 유역의 조건이나 모형상에서 제시되는 범위를 고려하여 결정하였으며, 각 매개변수의 최대값과 최소값을 기준으로 매개변수값을 무차원화하여 구분한 등급에 대하여 모형을 구동하고 그 결과를 바탕으로 예민도를 분석하여 평가하였다.

## 4. 오염부하량 공간분포 해석

본 연구에서는 유역 오염총량관리를 위한 지점별 배출부하량의 정량적 평가 및 잠재 오염부하량 배출 지점을 구체화하기 위하여, 빈도별 확률강우량에 대하여 AGNPS 모형을 이용하여 격자별 오염부하량의 공간적 분포를 해석하였다. 선정된 강우는 수원측후소의 20년 빈도에 대한 3, 6, 12, 24시간 지속시간의 확률강우량과 24시간 지속시간에 대한 2, 5, 20, 50년 빈도 확률강우량이다. 선정된 확률강우량의 강우침식성인자는 삼각형 강우분포모형을 이용하여 계산하였다.

## 5. 최적관리기법 및 토지이용 변화 해석

본 연구에서는 최적관리기법에 따른 모형의 평가 위하여, 발에 대하여 무경운법 (Recommended Conservation Practice Factor, RCPF1), 등고선재배법 (RCPF2), 테라스조성 (RCPF3) 등의 최적관리기법을 적용하여 모형을 구동하여 그 결과를 고

Table 2 Classification of BMPs

Item	C	P	Cover condition	Practice
RCPF1	0.03	1.0	Small grains	No-till
RCPF2	0.03	0.6	Small grains	Contour farming
RCPF3	0.03	0.2	Small grains	Terracing

찰하였다.

Table 2는 각각의 최적관리기법에 대한 USLE C와 P인자의 값을 나타내고 있다. 최적관리기법의 USLE C와 P인자의 값은 AGNPS 모형의 매뉴얼과 Kim et al. (1995)의 연구 결과를 참조하여 결정하였다.

한편, 개간 또는 택지 조성 등과 같은 건설공사는 유역내의 토지이용을 변화시키고, 도로, 택지 등은 불투수층을 증가하게 하며, 지형의 경사도 또한 달라진다. 이러한 건설공사 전후의 토지이용이나 지형 변화는 유출과 유사량 및 영양물질의 변화를 가져오게 된다. 따라서 수문 수질환경의 변화 정도는 유역내의 토지이용이나 지형 요소의 변화를 고려하여 계량화하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 토지이용변화 해석을 위하여 지형인자와 토지이용변화를 평가하기 위한 수문평가지수를 도입하였다. 대상 유역내의 수문평가지수는 수문환경의 변화정도를 수치적으로 계량화하여 나타내는 지수로서, 유역의 경사도나 토지이용의 변화 등을 이용하여 산정할 수 있다.

수문평가지수는 지형지수와 토지이용지수로 구분된다. 지형지수는 유역의 지형요소를 평가하기 위한 것으로서, 건설공사 또는 개간에 따른 지형의 경사 변화를 추출한다. 따라서, 수문평가지수는 오염총량의 증감을 간접적으로 평가할 수 있을 것이다.

지형지수는 경사도의 왜곡된 정도로 표현되며, 다음 식과 같다.

$$TI = \frac{a}{s^3} \quad (1)$$

여기서,  $TI$ 는 지형지수,  $a$ 는 비대칭성 매개변수,  $s$ 는 표준편차이다.

토지이용지수는 건설공사 또는 개간 등으로 토지이용의 변화 정도를 계량화하기 위한 지수로서, 다음 식과 같이 계산한다.

$$LUI_{agri} = \frac{AA}{WA} - \frac{FA}{WA} - \frac{UA}{WA} \quad (2)$$

$$LUI_{urban} = \frac{UA}{WA} - \frac{AA}{WA} - \frac{FA}{WA} \quad (3)$$

Table 3 Parameter values of reclamation types

Reclamation types	Reclamation type to less than 10° slope
Type I	Forest to paddy by reducing slope to 0.01°
Type II	Forest to urban by reducing slope to 0.01°

여기서,  $LUI_{agri}$ 는 농경지이용지수,  $WA$ 는 전체 유역 면적,  $AA$ 는 농경지면적,  $FA$ 는 산림지면적,  $UA$ 는 도시화면적, 그리고  $LUI_{urban}$ 은 도시이용지수이다.

본 연구에서는 토지이용변화에 따른 수문평가지수 및 오염원의 변화를 고찰하기 위하여 산지를 개간하여 다른 형태의 토지로 이용하는 경우를 선정하였다. 산지에 있어서 고려해야 할 사항으로는 기술적, 경제적, 사회적 요인 등이 있으며, 기술적 요인으로는 기상, 토양, 표고, 경사 등의 조건을 고려하여야 한다.

Table 3은 토지이용변화를 해석하기 위하여 선정된 산지개간 방법을 나타내고 있다. 산지개간 방법은 기계경운이 가능한 경사도 10°이내의 산지에 대하여 경사도를 0.01°로 농지조성하여 논으로 개간하는 방법 (Type I)과 경사도를 0.01°로 도시화하는 방법 (Type II)으로 구분하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 모형의 민감도 분석

Fig. 1과 Fig. 2는 AGNPS 모형의 수문·수질 매개변수의 예민도 분석 결과를 보여주고 있다. 수문 매개변수인 CN의 변화에 따른 유출량과 유사량, 그리고 영양물질의 예민도는 CN이 감소함에 따라 유출량과 유사량은 감소하였으나, 영양물질인 총질소와 총인의 농도는 증가하는 경향을 보였다. 특히 평균 CN값을 기준으로 CN값의 감소할 때, 총질소와 총인의 농도는 매우 예민하게 증가하였다. 이러한 결과는 유역의 특성상 CN값 감소에 따른 유출량 감소가 오염물질 유입으로 인해 수질이 악화됨에 따라 영양물질의 농도가 증가하는 간접적인 변화라고 사료된다. 따라서 유사량과 영양물질 부하량을 추정하기 위해서는 먼저 정확한 유출량의 추정이 선행되어야 할 것이다.

AGNPS 모형의 유사량 모의 결과에 영향을 미치는 매개변수의 예민도 분석 결과, 선정된 모든 매개변수가 증가함에 따라 유사량도 증가하는 것으로 나타났으나, Manning의 조도계수는 반대의 경향을 보였다. 이것은 조도계수가 증가함에 따라 침투유량이 감소하게 되고, 이에 따라 유사량이 감소하게 되는 것으로 보인다. 유사량의 모의치에 가장 민감하게 반응하는 매개변수는 격자내 경사인 것으로 나타났으며, 나머지 매개변수는 유사한 경향을 보였다.

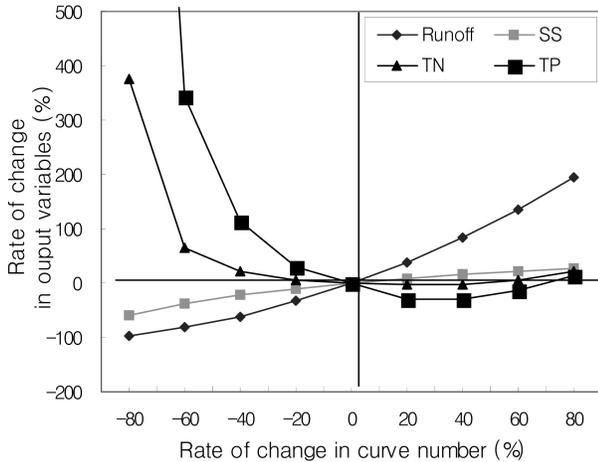


Fig. 1 Sensitivity analysis of the AGNPS model to curve number

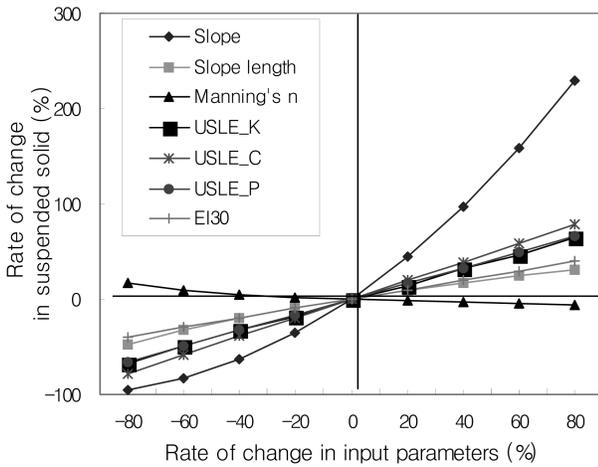


Fig. 2 Sensitivity analysis of the AGNPS model to suspended solid

2. 모형의 보정 및 검정

폭우사상별 격자기반의 비점오염원 부하량 추정을 위한 AGNPS 모형의 보정과 검정 및 적용성 평가 결과는 Kang et al. (2003)의 논문에서 상세히 발표되었으며, 모형의 적용성이 높은 것으로 나타났다. Kang et al. (2003)에 따르면, 시험구역의 측점에서 모니터링을 수행한 1996년부터 2000년의 자료기간에 대하여 총 67개 직접유출량에 대하여 보정과 검정을 수행하였으며, 그 결과의 평가는 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), 상대평균절대오차 (Relative Mean Absolute Error, RMAE), 그리고 효율지수 (Efficiency Index, EI) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. Table 4는 Kang et al. (2003)에 의해 수행되었던 유출과 수질 항목별 모형의 보정 및 검정에 대한 결과를 보여주고 있다.

Table 4 Summary of calibration and validation results at the study site (Kang et al., 2003)

Item		RB (%)	RMSE	RMAE	EI	R <sup>2</sup>
Runoff volume (mm)	Calibration	4.22	6.34	0.23	0.96	0.9606
	Verfication	19.68	13.45	0.32	0.90	0.9715
Peak runoff (m <sup>3</sup> /s)	Calibration	123.00	12.14	1.34	-0.95	0.6561
	Verfication	154.26	20.73	1.56	-2.55	0.9009
SS (ton)	Calibration	12.38	19.98	0.82	0.53	0.7187
	Verfication	59.13	21.07	0.99	0.27	0.7228
TN (kg)	Calibration	44.45	364.99	0.60	0.53	0.7094
	Verfication	58.41	577.00	0.64	0.05	0.7046
TP (kg)	Calibration	59.83	36.66	0.73	0.29	0.6890
	Verfication	67.25	48.98	0.71	-0.05	0.7069

3. 오염부하량 공간분포 해석

오염부하량의 분포를 해석하기 위한 강우자료 및 AGNPS 모형의 모의 결과는 Table 5에서와 같다. 선정된 강우사상의 강우침식성인자는 2년 빈도의 24시간 지속시간을 갖는 강우사상 (ST2-24)이 430 MJ · mm/ha · hr로서 가장 작은 값을 보였고, 20년 빈도의 3시간 지속시간을 갖는 강우사상 (ST20-3)이 3,234 MJ · mm/ha · hr로서 가장 큰 값을 나타내었다. AGNPS 모형에 의한 추정 결과 (Table 2), 강우량이 많을수록 유출량이 크게 나타났으며, 유사량과 영양물질은 재현기간이 동일할 때는 지속시간이 길수록 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 지속시간이 길수록 강우량과 유출량이 증가하기 때문인 것으로 나타났다. 또한, 지속시간이 동일한 경우에는 재현기간이 길수록 큰 값을 나타냈다.

Table 6은 대상강우에 대하여 유사량, 총질소, 그리고 총인의 토지이용에 따른 오염부하량의 구간별 격자의 수를 보여주고 있다. 강우사상에 따른 유사량, 총질소, 그리고 총인의 토지이용에 따른 구간별 격자의 수는 토지이용특성이 산림과 논,

Table 5 Simulated results with different storm events

Storm	Frequency (yr)	Duration (hr)	Rainfall (mm)	EI30 <sup>b)</sup>	Runoff (mm)	SS (kg/ha)	TN (kg/ha)	TP (kg/ha)
ST20-3	20	3	136.5	3,234	75.44	274.75	1.26	0.05
ST20-6	20	6	182.7	2,781	115.32	280.82	1.76	0.07
ST20-12	20	12	240.5	2,303	167.89	283.11	2.40	0.08
ST20-24	20	24	319.9	1,928	242.32	297.35	3.30	0.12
ST2-24	2	24	160.7	430	96.27	107.74	1.52	0.07
ST5-24	5	24	230.0	941	158.24	177.24	2.29	0.08
ST20-24	20	24	319.9	1,926	242.32	297.35	2.40	0.12
ST50-24	50	24	376.9	2,751	296.93	295.12	3.98	0.12

<sup>b)</sup> Unit; MJ · mm/ha · hr

**Table 6 Distribution of pollutant loadings for different storm events**

Item	Storm	Range <sup>1)</sup>	Number of cell			
			Suspended Solid		Total Nitrogen	Total Phosphorus
			Upland	Urbanization	Upland	Upland
For duration	ST20-3	< 2	12	37	29	28
		2~4	8	37	2	7
		4~6	10	9	4	0
		> 6	5	1	0	0
	ST20-6	< 2	14	45	29	28
		2~4	10	32	2	6
		4~6	8	7	3	1
	ST20-12	< 2	16	88	29	28
		2~4	12	27	1	6
		4~6	5	2	4	1
		> 6	2	0	1	0
	ST20-24	< 2	19	67	28	28
2~4		12	16	2	6	
4~6		3	1	4	1	
> 6		1	0	1	0	
For frequency	ST2-24	< 2	35	84	29	28
		2~4	0	0	2	6
		4~6	0	0	4	1
		> 6	0	0	0	0
	ST5-24	< 2	31	84	29	28
		2~4	4	0	2	6
		4~6	0	0	3	1
		> 6	0	0	1	0
	ST20-24	< 2	19	67	28	28
		2~4	12	16	2	6
		4~6	3	1	4	1
		> 6	1	0	1	0
ST50-24	< 2	14	45	28	28	
	2~4	11	32	2	6	
	4~6	7	7	4	1	
	> 6	3	0	1	0	

<sup>1)</sup> Range ; Suspended Solid-ton/ha, Total Nitrogen-kg/ha, Total Phosphorus-kg/ha

그리고 주거지에서는 변화의 양이 크지 않았으며, 밭의 경우에는 강우에 따른 큰 변화를 보였다. 다만, 유사량의 경우에는 도시화지역 대해서도 그 변화가 크게 나타났다. 유사량의 경우에 강우침식성인자가 큰 값을 보였던 ST20-3이 유사량이 큰 값을 보이는 격자의 수가 많은 것으로 나타났으며, 영양물질의

경우에도 유사한 경향을 보였다. 이러한 결과는 밭의 경우 다른 토지이용상태에 비하여 경사와 USLE C값이 상대적으로 큰 값을 나타내는 지형적 특성에서 비롯된 것으로 사료된다.

Fig. 3은 각각의 폭우사상에 대하여 AGNPS 모형을 이용한 오염부하량의 공간적 분포 해석 결과로서 총질소에 대한 예를 보여주고 있다. 이러한 유역 오염부하량의 공간적 분포해석은 유역내의 오염원 배출 잠재지역을 구체화하고 관리방안을 제시할 수 있을 것이다.

#### 4. 최적관리기법 및 토지이용 변화 해석

Table 7은 1997년 8월 4일 강우사상에 대한 최적관리기법에 따른 유출량과 유사량 그리고 영양물질의 변화를 보여주고 있다. 시험유역에서의 실측치는 강우량이 122 mm였고, 이에 따른 유출량은 85.9 mm, 유사량은 64.53 ton, TN은 1,515 kg, 총인은 123 kg이었다. 본 연구에서의 모의치는 등고선 재배법을 적용한 결과이다. 최적관리기법을 적용한 결과 유출량, 유사량, 그리고 영양물질 등 모든 항목에 대하여 RCPF3, RCPF2, RCPF1의 순으로 효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 8은 각 방법별 수문평가지수인 지형지수와 토지이용지수를 보여주고 있다.

지형지수는 경사도의 변화에 따라 변하며, 급경사 지역이 증가하면 (+)방향으로 이동하고, 급경사 지역이 감소하면 (-)방향으로 변한다. 따라서 Type I 은 지형지수가 개간 전에 비하여 (-)방향으로 변하고 있으며, 이는 급경사 지역이 감소된 것을 나타내고 있다.

농경지이용지수는 농경지 면적이 개간 등으로 인하여 증가하면 농경지이용지수가 (+)값을 보이고, 농경지 면적이 감소하면 (-)값을 나타낸다. 농경지이용지수는 산지가 논과 밭으로 개간된 Type I 은 (+)값을 보임으로서 농경지가 증가한 것을 보여주고 있다.

도시이용지수는 도시화 면적이 택지 개발 등으로 인하여 증가하면 도시이용지수가 (+) 값을 보이고, 도시화 면적이 감소하면 (-) 값을 나타낸다. 산지가 도시화된 Type II 의 경우가 (+) 값을 나타냄으로써 도시화 면적이 증가한 것임을 알 수 있다.

Table 9는 산지개간에 따른 방법별 오염부하량의 변화를 보여주고 있다. 실측치와 모의치는 최적관리기법에서와 동일하며, 논으로 개간한 Type I 이 유출량, 유사량의 경우에는 가장 작은 값을 보였으나, 총질소는 다른 토지이용변화에 비하여 큰 값을 보였다. 이는 논에서의 시비량에 의해 다소 크게 나타난 것으로 사료된다. 각각의 개간에 대하여 유출량이 작은 이유는 경사도가 감소한 때문으로 보인다.

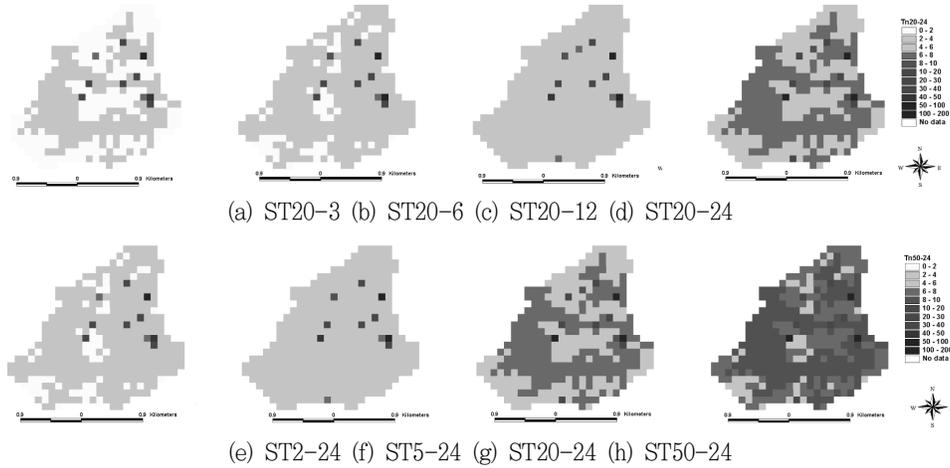


Fig. 3 Spatial variations of TN for different storm events

Table 7 Comparisons of simulated results with existing condition and three BMPs

Item	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak Runoff (m <sup>3</sup> /s)	SS (ton)	TN (kg)	TP (kg)
Observed	122	85.90	30.36	64.53	1515.00	123.00
Simulated	122	84.58	47.76	63.55	724.35	39.27
RCPF1	122	84.84	47.95	74.79	798.53	48.00
RCPF2	122	84.58	47.76	63.55	724.35	39.27
RCPF3	122	84.07	47.50	52.87	645.80	30.54

Table 8 TI and LUI parameters for reclamation types

Reclamation types	TI	LUI <sub>agri</sub>	LUI <sub>urban</sub>	Changed values to Observed		
				TI	LUI <sub>agri</sub>	LUI <sub>urban</sub>
Observed	0.000333	-0.43	-0.56	-	-	-
Type I	0.000222	-0.30	-0.56	-0.000111	+0.13	0
Type II	0.000222	-0.43	-0.43	-0.000111	0	+0.13

Table 9 Simulated results with reclamation types

Item	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Peak Runoff (m <sup>3</sup> /s)	SS (ton)	TN (kg)	TP (kg)
Observed	122	85.90	30.36	64.53	1515.00	123.00
Simulated	122	84.58	47.76	63.55	724.35	39.27
Type I	122	82.80	46.67	63.34	728.71	39.27
Type II	122	84.33	47.41	63.22	724.35	39.27

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 경기도 화성시에 위치한 발안저수지 유역의 HP#6 측점에서 385 ha의 유역면적을 가지는 농업 소유역을 시험유역으로 선정하였으며, 시험유역을 대상으로 비점오염원모

형인 AGNPS 모형을 이용하여 폭우사상에 따른 격자단위의 오염부하량 공간분포 해석을 통해 오염원 배출 잠재지역을 구체화하였으며, 최적관리기법을 적용하여 오염부하량 경감을 위한 대안을 평가하였고, 수문평가지수와 토지이용변화에 따른 비점원오염부하량을 계량화하여 그 결과를 평가 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 선정된 확률강우량에 대하여 AGNPS 모형을 적용한 결과는 강우량이 많을수록 유출량이 크게 나타났으며, 유사량과 영양물질은 재현기간이 동일할 때는 지속시간이 길수록 큰 값을 보였고, 지속시간이 동일한 경우에는 재현기간이 길수록 큰 값을 나타냈다.
  2. AGNPS 모형의 매개변수에 대한 예민도 분석 결과는 CN의 변화에 따른 총질소와 총인의 농도는 매우 예민하게 증가하였으며, 유사량의 모의치에 가장 민감하게 반응하는 매개변수는 격자내 경사인 것으로 나타났다.
  3. AGNPS 모형을 이용한 격자별 오염부하량의 공간적 분포 해석 결과, 밭의 경우 다른 토지이용상태에 비하여 경사와 USLE C값이 상대적으로 큰 값을 나타내는 지형적 특성에 의하여 다른 토지이용에 비해 강우사상에 따라 크게 변화하였다.
  4. 최적관리기법을 적용한 결과, 유사량과 영양물질의 변화는 무경운법, 등고선재배법, 테라스 조성의 순으로 효과가 큰 것으로 나타났다.
  5. 산지개간에 따른 오염부하량의 변화는 산림을 논으로 개간한 형태가 유출량, 유사량이 감소하는 것으로 나타났다.
- 격자단위의 비점오염원 모형은 유역에서의 오염원 위험지역의 구체화를 통한 최적관리기법의 적용을 가능하게 하며, 격자단위의 오염원 및 수질의 평가를 통한 유역 전반의 비점오염원

관리와 그를 위한 정책 수립에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- Bingner, R. L., and F. D. Theurer, 2007. AGNPS Web Site. <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5199>. Accessed in May 2009.
- Bingner, R. L., R. W. Darden, F. D. Theurer, and J. Garbrecht, 2008. GIS-based generation of AGNPS watershed routing and channel parameters. *ASAE Paper no. 97-2008*, St. Joseph, Michigan.
- Borah, D. K., and M. Bera, 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Transaction of the ASAE* 46(6): 1553-1566.
- Borah, D. K., and M. Bera. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Transaction of the ASAE* 47(3): 798-803.
- Brannan, K., 1998. Using geostatistics to select grid-cell layouts for the AGNPS model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 41(4): 1011-1018.
- Cho, J. P., 1998. Applications of AGNPS model with rural watersheds having complex land use characteristics. *Degree of Master Diss.* Seoul National University, Korea (in Korean).
- Chun, J. A., 2001. Pollutant loads estimation by direct runoff at a small watershed with GIS-AGNPS linked model. *Degree of Master Diss.* Seoul National University, Korea (in Korean).
- Fisher, P., R. J. Abrahart, and W. Herbinger, 1997. The sensitivity of two distributed non-point source pollution models to the spatial arrangement of the landscape. *Hydrological processes* 11(3): 241-252.
- Foerster, J., and W. A. Milne-Home, 1995. Application of AGNPS to model nutrient generation rates under different farming management practices at the Gunnedah Research Centre catchment. *AUST. J. EXP. AGRIC* 35(7): 961-967.
- Grunwald, S., 1999. An AGNPS-based runoff and sediment yield model for two small watersheds in Germany. *Transactions of ASAE* 42(6): 1723-1731.
- Kang, M. S., 2002. Development of total maximum daily loads simulation system using artificial neural networks for satellite data analysis and nonpoint source pollution models. *Ph. D. Diss.* Seoul National University, Korea (in Korean).
- Kang, M. S., and C. G. Kim, 2009. Review of hydrologic and nonpoint-source pollution models. *KCID Journal* 16(1): 39-48 (in Korean).
- Kang, M. S., S. W. Park, and J. A. Chun, 2003. Estimating pollutant loading using remote sensing and GIS-AGNPS model. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers (KSAE)* 45(1): 102-114 (in Korean).
- Kim, J. T., 1995. Development and application of a GRASS interface for the agricultural nonpoint source pollution (AGNPS) model. *Ph. D. Diss.* Seoul National University, Korea (in Korean).
- Lee, E. J., H. K. Kim, and S. W. Park, 2007. Assessing impact of non-point source pollution by management alternatives on arable land using AGNPS model. *Journal of Agriculture & Life Science* 41(4): 55-61 (in Korean).
- NIER, 2007. Developing nonpoint-source pollution prevention measurement. Ministry of Environment Republic of Korea (in Korean).
- Novotny, V., and Olem, H., 1994. Water Quality, Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, *Van Nostrand Reinhold*, New York.
- Park, S. W., 2006. Nonpoint-source pollution models - Review of applications. *Korea Water Resources Association - Water and Future: Special Issue* 39(12): 19-26 (in Korean).
- Srivastava, P, K. W. Migliaccio, and J. Simunek, 2007. Landscape models for simulating water quality at point, field, and watershed scales. *Transaction of the ASABE* 50(5): 1683-1693.
- USEPA, 1999. Protocol for developing nutrient TMDLs. EPA 841-B-99-007, Washington, D.C., USA.
- USEPA. 2008. Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters. EPA 841-B-08-002, Washington, D.C., USA.
- Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model. A watershed analysis tool. USDA, Conserv Res. Report 35.