

AnnAGNPS 모형을 이용한 경안천 유역의 수문·수질 모의

Simulation of Hydrological Behavior and Water Quality Using AnnAGNPS on Gyeong-an-Cheon Watershed

신형진* 권형중** 김성준***
Shin, Hyung Jin · Kwon, Hyung Joong · Kim, Seong Joon

Abstract

The objective of this study is to simulate streamflow and water quality for Gyeongan watershed (561.1 km²) using AnnAGNPS (Bingner et al., 2000). The model was calibrated and verified for three years (2000, 2002, 2003) stream discharge and water quality data observed at Gyeongan gauge station. It was observed that the model parameters such as CN, initial soil N-P, crop initial N-P were sensitive than other parameters during the calibration. Nash-Sutcliffe model efficiency of each year were 0.56, 0.84, 0.55, respectively and relative standard error between simulated data and observed data of TN, TP ranged from 9% to 59%.

1. 서론

강우시 도시지역 유출수, 농지 유출수 등 다수의 저농도 발생원인 비점오염원에 의한 수질오염의 비중이 증가하고 있다. 비점오염원은 그 발생원이 특정지점에 국한되어 있지 않고 광범위한 지역에 걸쳐 존재하고 강우강도나 지속시간과 같은 강우의 특성과 지표수의 수리·수문학적 특성과 밀접한 관련이 있으며, 유량의 변화가 크고 오염물질이 다양하다. 농경지에서 비점오염원은 강우에 따른 유출수와 더불어 산림

및 농경지 등에서 배출되는 토사와 질소나 인과 같은 영양염류 등이 주요 원인이 된다. 또한, 도시지역의 경우 표면에 쌓인 각종 분진, 오물 등이 강우시 지표수와 더불어 하천 등으로 유입되어 수계 오염을 유발시키고 있다. 생활하수와 산업폐수 등의 점오염원이 우세한 지역에서는 강우에 의해 희석효과가 나타난다.

그러나 비점오염원이 우세한 지역에서는 유역의 토양에 축적되어 있던 오염물이 강우의 침식에 의해 유출되므로 오염도가 증가하게 된다. 또한, 강우시에 비점오염원으로부터 유출되는

*건국대학교 대학원 (shjin@konkuk.ac.kr)

**건국대학교 대학원 (kwonhj@konkuk.ac.kr)

***건국대학교 환경시스템학부 (kimsj@konkuk.ac.kr)

키워드 : AnnAGNPS, 유출곡선번호, 총질소, 총인

물질의 농도도 높아지지만 우리나라 강우의 특성상 폭우시 유량도 크게 증가하므로 총 배출량이 매우 크게 된다(김범철, 1997). 도시지역 하천의 경우 각종 유해 독성물 및 중금속의 주요 오염원이 비점오염원으로 인한 것으로 밝혀지고 있으며 폐쇄성 수역의 경우 영양물질의 80% 이상이 비점오염원에 의한 것으로 계산되고 있다(최지용, 1998). 따라서 비점오염원은 점오염원에 비하여 오염의 정도는 낮지만 절대량이 크므로 강, 호수, 하구 등의 수질개선을 위해서는 비점오염원 평가 및 효율적인 관리가 필요하다. 유역에서 발생하는 오염부하의 평가를 위한 방법으로서 ANSWERS (Beasley et al., 1980), CREAMS (Frere et al., 1980), AGNPS (Young et al., 1987) 등의 유역관리 모형들이 응용되고 있는데, 이 중에서 AGNPS를 발전시킨 AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Model) 모형은 분포형 연속 강우사상 모형으로서 유출량, 유사량, 영양분의 이송을 모의한다. Yuan et al. (2001)은 미시시피에 위치한 Deep Hollow 호수 유역에 AnnAGNPS 모형을 적용하고 검증된 모형인자들을 이용하여 토사량 삭감을 위한 BMPs (Best Management Practices)의 유효성을 평가하였다. 배(2002)는 남한강 유역에 단위유역 크기에 대한 AnnAGNPS 모형의 민감도 분석을 연구하였고, 오(2000)는 대전 건천 유역에 AnnAGNPS 모형을 이용해 산정한 비점오염원 부하량과 원단위법에 의한 오염부하량을 비교 분석한 바 있다.

본 연구에서는 AnnAGNPS 모형을 경안천 유역에 적용하여 GIS 입력자료를 구축하고 유출 및 영양물질에 대한 모형의 구동을 통해 수문·수질 평가를 하고자 한다.

II. 모형의 개요

AGNPS는 미국 농무성 (Agricultural Research Service)과 토양보존국 (Nature Resources Conserveation Service) 그리고 미네소타 오염조절처 (Minnesota Pollution Control Agency, MPCA)에서 농촌 지역의 비점오염물질의 부하량 예측을 위하여 공동으로 개발한 모형이다. AnnAGNPS 모형은 먼저 개발된 AGNPS 모형에 기초를 두고 있다. AGNPS 모형은 단일 강우사상에 대해서만 모의가 가능한 반면 AnnAGNPS 모형은 AGNPS 모형의 이런 단점을 보완하여 연속강우사상 모형이고 장기간의 토사 및 오염물질의 이동을 예측할 수 있으며, 기본 모델링 구성은 수문기작과 토사, 영양물질 및 농약의 물질 이동기작으로 되어 있다. AnnAGNPS 모형은 분포형 비점오염원 모형으로써, 지형과 토양 종류 및 토지이용 등을 고려하여 유역을 균일한 격자로 세분화할 수 있는 GIS 구성 요소를 가지고 있다.

AnnAGNPS 모형은 Input program, AnnAGNPS, Output processor로 구성되어 있으며, Input program은 수리학적 배수지역과 DEM(Digital Elevation Model)으로부터 계산되어진 결과와 셀을 계산하기 위한 GIS 기반 프로그램인 Flownet Generator는 TOPAZ (Topographic Parameterization) 모형을 기반으로 DEM로부터 지형적 변수를 구하는데 이용할 수 있는 TOPAGNPS 모듈과 AGFLOW 모듈이 포함되어 있다. 일별 기후자료를 구성할 수 있는 GEM (Generation of weather Elements for Multiple applications), 입력자료의 초기화, 완성 및 수정을 위한 Input editor, 그리고 기존의 AGNPS 모델의 입력자료를 전환하는 AGNPS-to-AnnAGNPS 모델 converter 등으

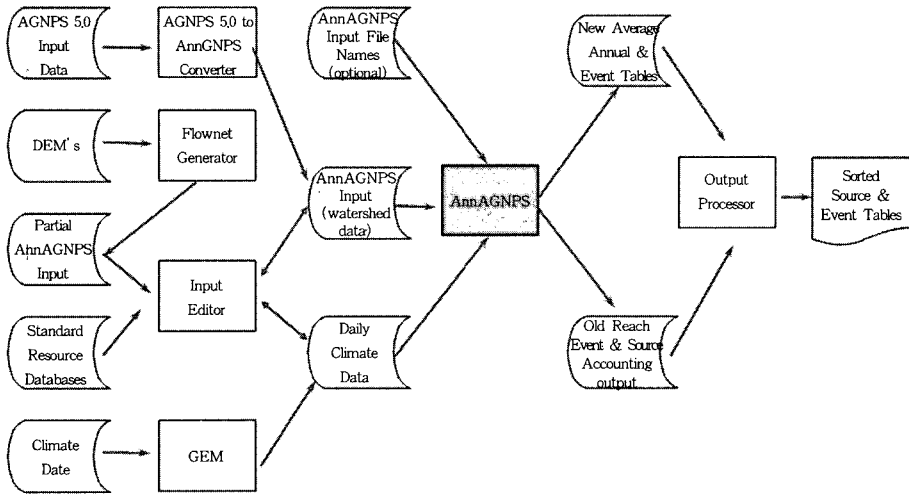


Fig. 1. AnnAGNPS System

로 구성되어 있다. Fig. 1은 AnnAGNPS 모형의 모의과정을 나타낸 것이다. AnnAGNPS 모형은 강우에 의한 지표 유출수량을 예측하기 위하여 SCS 유출곡선지수법 (SCS curve number method)을 사용하며, 그 식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

여기서, P = 호우별 총 우량 (mm),
 I_a = 강우초기의 손실 (mm) (I_a = 0.2 S),
 S = 유역의 최대잠재보유수량 (potential maximum retention) (mm),
 Q = 직접 유출량에 해당하는 유효우량 (mm)이다.

최대잠재보유수량은 유출곡선번호 (CN)을 사용하여 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

AnnAGNPS 모형에서는 강우에 의한 토사 유출량을 산정하기 위하여 RUSLE (Revised USLE)를 이용하며, USLE (Universal Soil Loss Equation)를 기본으로 입력된 변수에 따라 적절하게 인자들을 결정하여 토양손실을 예측한다. 기본이 되는 USLE는 다음과 같다.

$$A = EI \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

여기서, A = 토사 유출량 (ton/acre),
 EI = 강우에너지 인자,
 K = 토양침식 인자,

LS=지형특성 인자,

C=식생피복 인자,

P=토양보존 인자.

AnnAGNPS 모형에서 모의 가능한 영양염류는 질소와 인으로, 각 단위 셀을 대상으로 물에 용해되어 이송되는 것과 토사에 흡착되어 이송되는 것으로 나누어 계산된다. 토사에 흡착되어 있는 형태의 영양염류의 양은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$ma, cell = Ca, smsedER \quad (4)$$

여기서, ma, cell=토사에 흡착된 영양염류의 양(kg),

Ca,s=토사 입자에 흡착되어 있는 영양염류의 농도 (kg/kg sediment),

msed=침식된 토사량 (kg),

ER=고형계수.

용존성 질소와 인의 양은 각 아래 식을 이용하여 산정한다.

$$ms, cell, N = 10A_{cell} \Delta w [(CS + CF + CR) (e^{-k \cdot l \cdot F} / d \cdot sl / POR) (1 - e^{-k \cdot r \cdot Q / d \cdot sl / POR}) dslPOR + CRQ] \quad (5)$$

$$ms, cell, P = 10A_{cell} \Delta w [CF (e^{-k \cdot l \cdot F} / d \cdot sl / POR) (1 - e^{-k \cdot r \cdot Q / d \cdot sl / POR}) dslPOR + CSQKr] \quad (6)$$

여기서, ms, cell=용존성 영양염류의 총량 (kg),

A_{cell}=cell면적(m²), Δw=물의밀도 (kg/m³),

CS=토양에 있는 용존성 영양염류의 농도

(kg/kg),

CF=비료에서 기인하는 용존성 영양염류의 농

도 (kg/kg),

kl=leaching extraction 계수,

kr=runoff extraction 계수,

F=침투되는 강우의 양 (mm),

Q=유출수 (runoff)의 양 (mm),

Fe=F-dsl POR,

dsl=유출수와 접하는 토양 표층의 깊이 (mm),

POR=1-Δb, s/Δr, Δb,s=토양 표층의 bulk density(kg/m³), Δr=mineral rock의 밀도 (kg/m³).

AnnAGNPS 모형에서 질소와 인 외에 얻을 수 있는 수질오염 항목으로는 총 유기탄소가 있으며, 기존의 AGNPS가 COD를 계산하였던 것과는 달리 용존된 형태와 토양입자에 흡착된 형태의 유기탄소를 계산한다.

III. 대상유역 및 자료구축

1. 대상유역 개요

본 연구의 대상은 경안천 경안교에 위치한 경안수위관측소 상류유역으로 경안천은 경기도 용인시 문수봉 계곡에서 발원하여 용인시 및 광

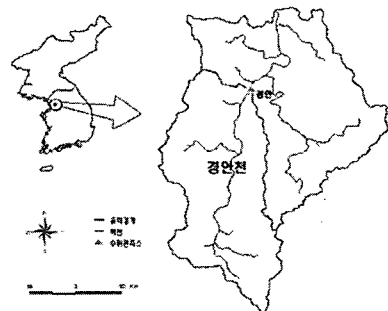


Fig. 2. Study area

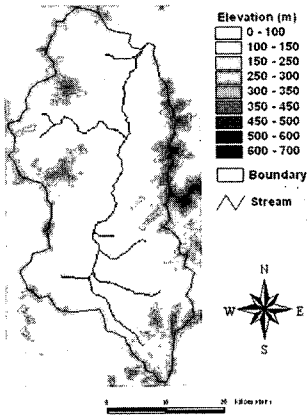


Fig. 3. DEM

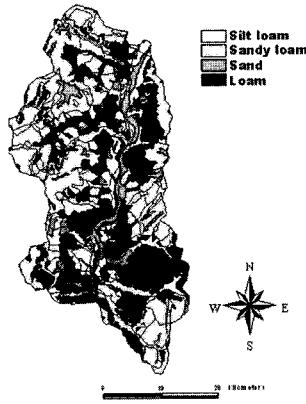


Fig. 4. Soil type

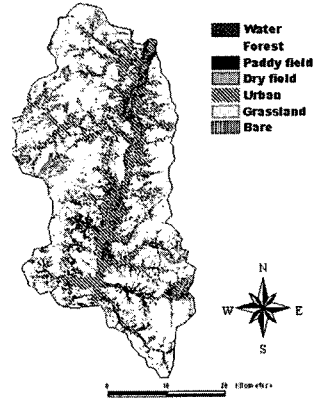


Fig. 5. Land use

주군 2읍 10면을 지나 팔당호로 유입되는 한강의 1차 지천으로 경안천 유역의 전체 면적은 561.1km²이고 유로연장은 약 47.9km이다.

모형의 검·보정을 위한 경안수위관측소 상류 유역의 유역면적은 257.9km²이며 유로 연장은 약 30km이다(Fig. 2).

2. 기상, 수문, 수질자료 수집 및 구축

대상지역의 기상자료는 이천기상관측소의 기상자료를 이용하였으며, 1999년 1월 1일부터 2003년 12월 31일까지의 기상자료를 사용하였다. 사용되는 기상 속성은 최고 온도, 최저 온도, 강수량, 이슬점 온도, 풍속, 운량이며 이천

기상관측소에서 관측되지 않는 운량은 수원기상관측소의 기상자료를 이용하였다. 수문자료는 한강홍수통제소에서 제공하는 일단위 유량 자료를 사용하였다. 경안천은 하류 지점의 댐등의 조작으로 갈수시 수문 변화가 미미한 것과 동절기에 결측 자료가 많으므로 모의시에 이러한 상황들을 고려하였다. 수질자료는 경안천 경안교 지점에서 매일 1회 측정되는 환경부 수질 자료를 이용하였다.

3. 지형자료

대상지역을 적절한 크기의 셀로 나누고 각 셀에 대한 정보 (면적, 유로장, 흐름도 등)를 계산

Table 1. Hydrologic Soil group

Hydrologic Soil group	Soil Feature
A	High infiltration rate
B	Moderate infiltration rate
C	Slow infiltration rate
D	Very slow infiltration rate

Table 2. Runoff curve number for AMC II (USDA-ARS, 1994)

Land cover	Hydrologic soil group			
	A	B	C	D
Forest	56	75	86	91
Paddy field	67	78	85	89
Dry field	72	81	88	91
Grassland	63	77	85	98
Bare	77	86	91	94
Urban	77	85	90	92
Water	100	100	100	100

하기 위하여 Flownet Generator를 실행하였다.

이때 입력자료는 대상지역의 DEM이 사용되며, DEM은 NGIS 1:5,000 수치지도로부터 생성하였으며, 모형 구동의 용이함을 위해 100m 간격으로 구축하였다(Fig. 3.). 또한, 각 셀에서의 오염량, 침식량 등을 계산하는데 필요한 인자 및 지형정보를 위해서 토양도와 토지피복도가 요구된다. 토양도는 서울대 농공학과에서 제작한 농촌진흥청 1:50,000 개략토양도를 사용하였고, 토양 특성에 따라 토양 침

식량 산정을 위한 RUSLE식의 토양침식인자(K)와 수문학적 토양군 Table 1, 점토·식토·사토·암석의 비율, 유기물 함량 등은 농업토양정보시스템(2002)의 각 토양통에 대한 속성들을 참고하여 입력하였다(Fig. 4).

경안천 유역의 격자별 토지피복은 국립지리원에서 제공하는 1:25,000 토지이용도를 이용하였다. 이를 7가지의 토지피복으로 재분류하여 Fig. 5와 같은 토지피복도로 작성하였다. 토지피복과 관련된 입력 변수는 Table 3에 제시된

Table 3. Model input parameter associated with land cover (USDA-ARS, 1994)

Land cover	Surface Condition factor	RUSLE P factor	Manning's coefficient
Forest	0.29	1.00	0.400
Paddy field	0.21	variable	0.170
Dry field	0.21	variable	0.170
Grassland	0.13	0.17	0.150
Bare	0.01	1.00	0.011
Urban	77	85	90
Water	0.00	0.00	0.000

source : Young et al. (1982), Foster and Highfill. (1983), Foster et al. (1980)

Table 4. Comparison of observed and simulated runoff discharge

Date	Observed-flow (CMS)	Simulation (CMS)	Nash-Sutcliffe eff.	Remark
2000	2,076	1,736	0.56	Calibration
2002	2,090	2,318	0.84	
2003	3,972	3,407	0.55	Verification

자료를 이용하였으며, 토지피복과 토양그룹에 의해 결정되는 유출곡선지수는 Table 2에 제시된 자료를 사용하였다.

IV. 모형의 적용

1. 유출량의 보정 및 검증

유출량의 보정 및 검증을 위해서 유역을 38개의 소유역으로 분할하고 1999년 1월 1일부터 2003년 12월 31일의 기간에 대하여 모의하였다.

본 연구에서는 2000년 1월 1일부터 2000년 12월 31일, 2002년 1월 1일부터 2002년 12월 31일까지의 유출량 자료를 이용하여 모형의 보

정을 실시하였고, 보정된 매개변수를 이용하여, 2003년 1월 1일부터 2003년 12월 31일 기간에 대하여 검증하였다(Fig. 6., Fig. 7.). AnnAGNPS 모형은 특성상 연중 모의를 해도 강우사상이 있는 구간만 모의가 되므로 유량 값을 점으로 나타내었다.

대상 유역의 지역특성을 고려하여 유출곡선지수를 조정하여 보정하였으며, AnnAGNPS 모형은 특성상 관측 값 중 건기인 1, 2, 3월의 값을 평균하여 기저 값으로 사용하였다. 모의된 유출 결과(Table 4)에 대한 정확도는 Nash와 Sutcliffe(1970)의 효율계수 함수인 식(7)을 이용해서 계산했다. Served와 Dezetter (1991)는 이 효율식이 수문곡선의 전체적인 적합성을

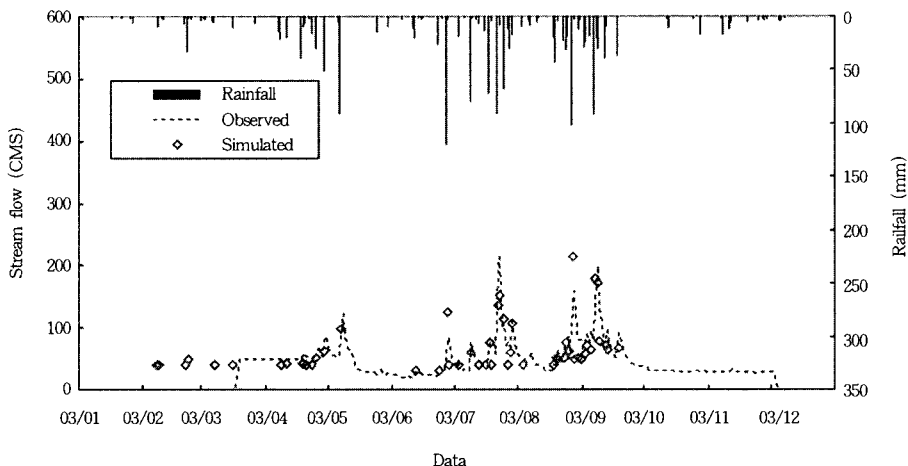


Fig. 7. Verification results

반영하는데 있어 가장 우수한 목적함수 (object function)임을 밝혔다.

$$Em = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \Pi)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

여기서, Em = 효율계수,

O_i = i 번째 관측치, Π = i 번째 모의치, \bar{O} 는 관측치 평균이다.

2000년 및 2002년 기간에 대하여 모형의 보정을 실시하였으며, 보정된 모형을 이용하여 2003년에 대하여 검증하였다. 본 모형은 강우 사상이 있는 기간에 대하여 모의 되므로, 모의된 날짜의 관측치와 모의치로서 모형효율을 계산한 결과, 2000년 및 2002년에 대하여 각각 0.56 및 0.84로서 나타났다. 모형의 검증을 위하여 2003년 기간에 대하여 모의한 결과 모형효율은 0.55로 나타났으며, 모의 결과가 관측치를 잘 추적하는 것으로 나타났다.

2. 부하량

총 인, 총 질소는 하천 수질 농도에 유량을 곱하여 실측 부하량을 산정하였다. 유량과 마찬가지로 모델에서 강우사상이 있을 때만 부하량이 계산되므로 유량과 같이 기저값을 사용하였으며, 기간은 2000년, 2003년이다. 환경부 수질 자료가 매월 1회 측정되므로 강우사상이 있을 때 모의치와 비교하였다(Table 5.). 보정을 하기 위해 민감한 매개변수로 판단된 Crop Initial N, P 와 N, P uptake 등 농작물 관련 입력변수를 조정하였다. 비점오염원의 주요한 원인인 총 인과 질소는 강우시 발생하는 토양의 침식에 의해 발생된다.

대상유역의 수질관측소는 환경부의 경안수위 관측소로서 유역출구점에 위치하고 있어 유역에서 발생한 오염부하량을 토사에 흡착 및 물에 용해되어 이송되는 모의를 실시하여 유역의 출구점에서 발생한 오염부하량을 산정하였다. 수질관측 날짜에 대하여 관측치와 모의치(TN, TP)를 비교한 결과, 9%에서 59%의 상대오차를 보였다.

Table 5. Comparison of observed and simulated TN and TP

	Runoff (CMS)			TN (mg/l)			TP (mg/l)		
	Obs.	Sim.	Relative error (%)	Obs.	Sim.	Relative error (%)	Obs.	Sim.	Relative error (%)
2000.1.1	27	25	7	13.59	9.91	27	0.31	0.14	54
2000.7.1	46	25	2	9.32	8.17	12	0.67	0.74	10
2000.8.1	23	25	8	6.69	7.51	12	0.69	0.79	10
2000.9.1	71	42	40	3.92	3.38	13	0.11	0.12	9
2003.3.1	0	30	30	12.33	5.03	59	0.42	0.66	57
2003.7.1	103	171	66	4.56	3.64	20	0.37	0.47	27
2003.8.1	173	162	6	3.66	2.18	40	0.26	0.13	50
2003.10.1	51	30	21	9.47	5.49	42	0.73	0.57	21

V. 결론

본 연구에서는 경안천유역의 경안수위관측소 상류유역을 대상으로 TOPAGNPS 모듈에 의해 38개의 소유역으로 분할하고 GIS 자료 및 기상 자료를 이용하여 AnnAGNPS 모형을 적용하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. DEM, 토양토, 토지피복도, 수문기상자료를 이용하여 3개년도에 대한 AnnAGNPS 모형을 적용하여 유출량에 가장 큰 영향을 끼치는 인자인 유출곡선지수를 선정하여 모형보정을 수행한 결과 각각의 대상기간에 대해 Nash-Sutcliffe의 모형효율은 0.55 0.84의 범위를 보이며 유출의 양적인 측면과 경향을 잘 반영한다고 판단된다.

2. 영양물질의 경우, 총 질소와 총 인의 오염 부하량을 기준으로 모형 보정을 수행한 결과, 수질관측 날짜에 대하여 관측치와 모의치(TN, TP)를 비교, 9%에서 59%의 상대오차를 보였다.

3. 수치지형분석모형기법을 이용하여 DEM으로부터 모형에 이용되는 매개변수와 지형자료를 획득함으로써 보편화되고 신뢰성 높은 지형 자료를 빠르게 구축할 수 있으며, 이는 앞으로 분포형 모형에 GIS의 도입에 있어 자료구성 및 기후, 토양토, 토지피복등의 외적인 요소의 영향과 유역 내의 수문·수질 변화의 영향을 평가하는데 있어 매우 유용하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김범철, 1998, 비점오염원과 수중생태계, 강원대학교.
2. 농업토양정보시스템, 2002, <http://asis.rda.go.kr>.
3. 배인희, 2002, 분산형 비점오염원 모델의 단위유역 크기에 대한 민감도 분석 연구, 이화여자대학교 석사학위 논문.
4. 오경미, 2000, GIS를 이용한 연속분포형 비점오염원 (AnnAGNPS) 모델 타당성 연구, 한국과학기술대학원 석사학위 논문. p.20.
5. 최지용, 1998, 우리나라 비점오염원 배출특성과 관리방안, 국립환경정책평가 연구원.
6. Beasley, D.B., F. Huggins and E.J. Monke, 1980, ANSWERS - A Model for Watershed Planning, Transactions of the ASAE, Vol. 23, pp.938-939.
7. Bingner, R.L. and F.D. Theurer, 2000, AnnAGNPS Version 2 : User Documentation USDA-NRCS.
8. Frere, M.H., J.D. Ross and L.J. Lane, 1980, The nutrient submodel. In : CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA Cons. Res. Report, Vol. 26, pp.65-85.
9. Foster, G. R. and R.E. Highfill, 1983, Effect of terraces on soil loss : USLE P factors for terraces, Journal of Soil Water Conservation, Vol.38, No.1, pp.48-51.
10. Foster, G. R., L. I. Lane and J. D. Nowlin, 1980, A model to estimate sediment yield from field-sized areas: Selection of parameter values. In CREAMS: A Field-scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion front Agricultural Management Systems, ed. W. G. Knisel. U.S. Dept. of Agriculture, Conservation Research Report, No. 26. Washington, D.C. : USDA.
11. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe, 1970, River flow forecasting through conceptual model: Part 1 - A discussion of principles. Journal of Hydrology, Vol. 10(3), pp.282-290.
12. Servat, E. and A. Dezetter, 1991, Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area, Hydrological Sciences Journal, Vol. 36, pp. 307-330.
13. Young, R. A., C. A. Onstad, D. Bosch and W.P. Anderson 1987, AGNPS, Agricultural Non-point Source Pollution Model: a watershed analysis tool, USDA, ARS, Conserv. Res. Report 35, Washington D. C., p.77.
14. Yuan, Y., R.L. Binger and R.A. Reibich, 2001, Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi delta MSEA watersheds, Transactions of the ASAE, Vol. 44, pp.1183-1190.
15. USDA-ARS, 1994, Agricultural Non-Point Source pollution Model, Version 4.03 AGNPS USER'S GUIDE, Morris, Minnesota.