

RS와 GIS-AGNPS 모형을 이용한 소유역에서의 비점원오염부하량 추정

Estimating Pollutant Loading Using Remote Sensing and GIS-AGNPS model

강 문 성* · 박 승 우** · 전 종 안***

Moon S. Kang · Seung W. Park · Jong A. Chun

Abstract

The objectives of the paper are to evaluate cell based pollutant loadings for different storm events, to monitor the hydrology and water quality of the Baran HP#6 watershed, and to validate AGNPS with the field data. Simplification was made to AGNPS in estimating storm erosivity factors from a triangular rainfall distribution. GIS-AGNPS interface model consists of three subsystems; the input data processor based on a geographic information system, the models, and the post processor. Land use patten at the tested watershed was classified from the Landsat TM data using the artificial neural network model that adopts an error back propagation algorithm. AGNPS model parameters were obtained from the GIS databases, and additional parameters calibrated with field data. It was then tested with ungauged conditions. The simulated runoff was reasonably in good agreement as compared with the observed data. And simulated water quality parameters appear to be reasonably comparable to the field data.

Keywords : RS, GIS, AGNPS, Water quality, Artificial neural network

I. 서 론

농업유역에서의 비점오염의 순환기작에 대한 연구가 구미 지역에서는 활발히 진행되어 왔다. 그러

나, 이들은 밭을 대상으로 하며, 주요 작물, 경종 및 시비방법, 기상수문 조건 등에서 우리 농업과 큰 차이를 갖고 있어 적절한 보완과 검증은 거치지 않을 경우 적용성에 의문이 있는 것이 사실이다. 특히, 논에서의 수문과정과 오염부하기작은 밭과는 다르므로 국내 상황에 맞는 비점오염 부하량의 추정과 그 기작의 구명을 위한 현장조사 및 모델링이 필요하다.

AGNPS 모형은 미국 농무성의 농업연구소 (agricultural research service, ARS)와 미네소타

* 서울대학교 농업생명과학연구원
** 서울대학교 농공학과
*** 한국건설기술연구원 GIS 사업단
* Corresponding author. Tel.: +82-31-290-2371
fax: +82-31-292-6807
E-mail address: kms97@phoenix1.snu.ac.kr

환경보전국 (Minnesota Pollution Control Agency) 및 토양보전국 (Soil Conservation Service, SCS) 에서 통일된 방법으로 농촌유역의 비점오염의 발생 원 파악과 이의 억제를 위한 최적관리기법(Best Management Practices, BMP)를 적용하기 위한 목적으로 공동 개발된 것으로서, 단일 폭우사상에 대한 분포형 매개변수 모형이다.^{1),2),7),14)}

이러한 분포형 모형은 방대한 입력자료를 필요로 하고, 결과를 분석하는데 있어서도 많은 노력이 따른다. 분포형 모형의 적용에 있어서는 자료를 효율적으로 관리할 수 있는 분석 도구로서 지리정보 시스템 (geographic information system, GIS)이 이용되고 있다.⁶⁾ 또한, 토지피복분류는 유역의 수문·수질 해석 결과의 정도를 좌우하는 중요한 인자이다. 유역의 토지피복상태를 분류하는 방법으로 최근에 이용되고 있는 방법이 위성영상을 이용한 간접적인 방법이다. 위성영상의 이용은 정보의 최신성이나 분류의 자동화 및 결과의 수치화 등의 측면에서 장점을 가지고 있으며, 시간과 비용면에서도 효과적이다.^{3),4)}

따라서, 비점오염부하량의 추정 및 평가 해석은 국내의 토지이용특성을 반영할 수 있는 적절한 모형을 선정하고, 모형의 구성요소를 종합적으로 고려하여 오염부하량의 공간적 분포와 계량화가 이루어져야 하며, 이를 통하여 효과적인 최적관리기법의 대안을 제시하여야 할 것이다.

본 연구의 목적은 소유역에서의 오염부하량을 추정하기 위하여, 대상유역을 선정하여 유역수문특성을 조사 분석하고, 원격탐사기법과 지리정보시스템을 이용하여 대상유역의 도형자료를 구축하며, AGNPS 모형을 적용하여 오염부하량을 추정하여, 그 적용성을 평가하는 데 있다.

II. 연구방법

1. AGNPS 모형

AGNPS 모형은 수 acre에서 202.3 km² (50,000 acre)의 유역에서 발생하는 폭우사상에 대한 유출과 침투유량, 토양유실, 총질소, 총인, 화학적 산소 요구량 (chemical oxygen demand, COD) 등의 비점원오염 부하량을 추정하도록 되어 있다.

AGNPS 모형은 수문부분, 유사운송 및 수질부분으로 구성 되어 있으며, 유역을 균일한 크기의 정방형 격자 (cell)로 분할하고, 유역의 각 점에 대해 분석하는 분포형 격자형 모형으로, 유출과 침투유량, 토양유실, 총질소, 총인, 화학적 산소요구량 등을 각 셀에 대한 지형, 토지이용, 토양 및 식생, 테라스 등 농지보전법, 시비량과 유효량, 걸리 침식량이나 축산 또는 그 밖의 점원 오염량 등의 셀 별 입력자료와 강우량, 강우 에너지계수 등의 유역 입력자료 등으로 부터 추정하도록 구성되어 있다. AGNPS 모형의 구조와 이론적 배경은 Young 등 (1987)과 Kang (2002)에서와 같다.

2. 영상분석방법

위성영상을 이용한 토지피복분류중에서 가장 일반적인 분류방법은 최대우도법 (maximum likelihood classifier, MLC)이다. 최대우도법은 트레이닝 데이터들의 평균값과 데이터들간의 분산, 공분산 값을 특징 값으로 이용하는 분류법으로 분류 정답률이 매우 높으며, 데이터들의 확률밀도 함수가 Gaussian 분포를 가진다면 가장 우수한 분류방법이다. 그러나 일반적인 데이터들의 확률밀도 함수는 Gaussian 분포가 아닐 경우가 보통이며, 이러한 데이터 분포를 가질 때는 분류 정답률이 낮은 것으로 보고하고 있다.¹¹⁾ 인공신경망을 이용한 위성영상의 카테고리 분류방법은 1990년 초기에 시작되어 관심을 가지게 된 최근의 분류방법으로 데

이터들의 확률밀도 함수를 가정하지 않는 것이 가장 큰 장점이다.

본 연구에서는 입력층에서의 화소값을 고려하여 여러 형태의 신경망 모형으로 구성하였으며, 최적 모형으로 Model75모형을 선정하였다. Model75 모형은 입력층이 위성영상의 7개 밴드의 화소값이며, 출력층은 산림, 논, 밭, 주거지 및 물의 5개 카테고리로 구성되었다. 모형의 입출력 자료는 식 (11)과 같이 구성된다.

$$\text{Model75: } O(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5) = \text{function}(B(1), B(2), B(3), B(4), B(5), B(6), B(7)) \dots \dots \dots (11)$$

여기서, $O(c_i)$ 는 카테고리별 출력값, $B(i)$ 는 i 번째 밴드의 화소값이다.

3. GIS-AGNPS 호환모형

GIS-AGNPS 호환 모형은 AGNPS 모형의 효율적인 입력자료의 생성과 모의 결과의 시각적 출력을 위하여 PC (personal computer)기반의 Arc-View 환경하에서 연동되도록 구성하였다. GIS-AGNPS 모형은 강우분포모형을 고려하여 강우에너지를 연속적으로 산정함으로써 격자 단위의 연간 폭우사상에 대한 비점원오염부하량을 추정할 수 있도록 하였다.

Fig. 1은 GIS-AGNPS 호환 모형의 처리 순서도를 보여주고 있다. GIS-AGNPS 호환 모형은 크게 GIS 자료 구축, 강우분포모형, AGNPS 모형으로 구성되어 있다.

GIS의 자료 구축은 ArcView의 Avenue에 의한 Extension을 이용하여 기본도로부터 모형의 입력 자료로 이용되는 주제도를 추출하도록 하였다. 추출된 주제도는 격자로 분할하고, 격자별 속성값을 갖는 Ascii 코드로 전환한다.

해당 지역의 강우자료를 바탕으로 강우분포형태를 결정하도록 하였으며, 강우일의 강우량이 이론적으로

유출이 발생할 수 있는 13.5 mm보다 크면, 선정된 강우분포모형을 적용하여 해당 강우량과 강우지속시간에 대한 강우에너지를 산정하도록 구성하였다.

폭우사상별 비점원오염은 구축된 자료를 AGNPS 모형의 입력 형태로 변환하여 구동함으로서 단일 폭우사상에 대한 비점원오염 부하량을 산정하도록 하였다.

연간 폭우사상에 대한 오염부하량은 해당 기간에 걸쳐 일정 강우 이상이 되면 연속적으로 계산되도록 구성하였다. AGNPS 모형의 모의 결과는 Avenue를 사용하여 ArcView와 호환이 가능하며, 표나 그래프로 출력할 수 있도록 구성하였다

강우의 분포는 공간적으로 그 분포의 형태가 다양하며, 우리나라와 같은 산악지대의 강우분포형태와 AGNPS 모형의 개발지역인 미국에서의 강우분포형태는 그 차이가 있다. 강우에너지는 유사량과 영양물질의 유출에 민감한 인자이므로 국내의 강우형태를 고려하여 보다 정도가 높은 값을 산정하여야 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 AGNPS 모형의 입력자료인 강우침식성인자에 대하여 Lombardi (1979)가 제안한 방법 (Lom), AGNPS 모형에서 사용하고 있는 Trey (1997)에 의한 방법 (Tr1, Tr2, Tr3, Tr4), 강우분포모형인 삼각형 강우분포에 의한 방법 (Tri), 사각형 강우분포에 의한 방법 (Tra), 그리고 Mononobe에 의한 방법 (Mon)에 의하여 산정하고 비교하였다.

강우분포에 의한 방법중에서 Yen & Chow법에 사용된 계수들은 건설교통부 1999년도 수자원관리 기법개발연구조사 보고서 “지역별 설계 강우의 시간적 분포” (2000)⁸⁾에서 제시한 수원기상대의 자료를 분석한 결과값을 사용하였다. 건설교통부의 분석 결과에 의하면, 삼각형 분포에서 첨두강우 발생점에 관한 계수 a는 0.42인 것으로 보고되고 있으며, 사다리꼴 분포에서의 등분포강우 시작점에 관한 계수 a는 0.18, 등분포 시간에 관한 계수 b는 0.32인 것으로 나타났다.

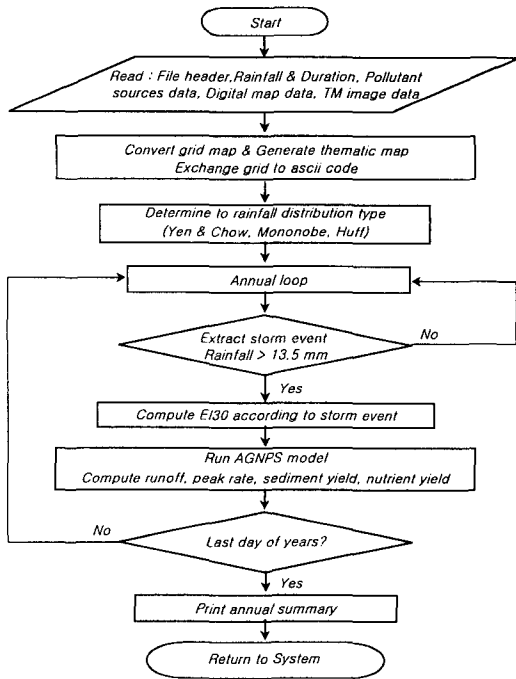


Fig. 1 Flow chart of GIS-AGNPS interface model

III. 시험구역 및 자료구축

1. 시험구역

소유역에서의 폭우사상별 오염부하량을 추정하기 위한 시험구역으로 발안저수지 구역의 HP#6번 소유역을 선정하였다. 발안저수지 구역은 경기도 화성시 팔탄면과 봉담읍에 위치하고 있으며, 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다.⁵⁾

시험구역의 구역특성인자는 구역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 하천평균경사, 하천빈도 등을 조사하였다. 발안구역의 HP#6 소유역은 면적이 385 ha, 유로장이 3.1 km, 구역경사가 1.5 m/km였고, 형상계수가 1.56으로서 정방형의 소유역이다.

기상자료와 강우자료는 발안지 구역으로부터 약

10 km에 위치한 수원기상대의 자료를 이용하였다. 발안구역과 수원측후소 간의 공간적인 차이가 존재하므로 보다 정확한 강수량 자료를 얻기 위해 발안저수지 구역내에 강수측점을 설치하였다.

2. 수문자료

HP#6 측정의 하천수위자료는 자기 수위계와 압력식 수위계를 설치하여 수위를 관측하였다. 폭우시에 유속을 측정하여 수위-유량관계를 결정하고, 이로부터 유량자료를 수집하였다. 압력식 수위계는 Global Water에서 만든 WL-14 Global Water Level Logger를 이용하였다. 하천 수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하기 위해, 수위별로 유량을 조사하였다. 현장 출장을 통해 폭우시 고수위 유량 측정과 평상시 저수위 유량 측정을 측정하여 수위-유량관계를 구하였다.

현장 측정을 통하여 얻어진 수위-유량관계를 나타내면 Fig. 2와 같다. HP#6 측점은 1998년 대홍수로 인하여 하상의 변동이 심하여 수위-유량관계식을 다시 유도하였다. 각 수위-유량의 상관관계식에서 보여준 결정계수는 HP#6 측점이 연도에 따라 0.913과 0.979의 범위를 보였다.

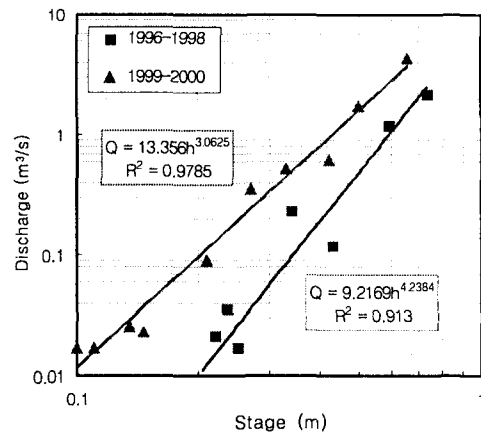


Fig. 2 Stage-discharge relationships at the HP#6 station

Table 1 Observed rainfall, rainfall erosivity factor, runoff and peak runoff rates

Name	Rainfall (mm)	El ₃₀ (MJ·mm/ha·h)	Runoff (mm)	Peak (m ³ /s)	AMC	Name	Rainfall (mm)	El ₃₀ (MJ·mm/ha·h)	Runoff (mm)	Peak (m ³ /s)	AMC
S960329	32.00	151.65	2.25	0.17	1	S990523	22.61	8.34	1.18	0.36	2
S960610	33.00	93.27	1.39	0.13	1	S990616	27.18	19.91	0.96	0.22	1
S960617	181.50	1305.09	86.94	29.05	1	S990623	28.70	26.38	2.58	0.41	1
S960624	20.00	61.44	2.27	0.15	1	S990709	62.74	370.36	8.13	2.99	1
S960704	53.50	233.00	17.56	4.93	1	S990801	58.67	248.15	17.59	3.26	3
S960715	39.00	130.88	6.71	2.23	1	S990802	192.02	802.49	169.78	21.01	3
S960722	21.50	97.69	4.66	3.12	1	S990803	62.99	325.42	39.83	30.29	3
S960728	33.00	190.96	6.35	0.36	1	S990905	49.28	106.20	5.16	1.52	1
S960827	30.50	85.95	5.34	1.34	1	S990909	23.88	31.32	2.13	0.63	3
S961006	22.50	18.72	2.25	0.27	1	S990918	16.26	9.36	0.87	0.26	1
S961024	26.50	25.02	3.14	0.31	1	S990919	61.72	229.43	14.73	6.52	1
S970225	16.50	20.42	0.39	0.03	1	S990920	147.32	353.34	95.00	14.80	3
S970228	24.00	8.68	2.21	0.41	1	S990921	85.09	257.00	40.39	14.29	3
S970306	17.50	20.59	1.76	0.31	1	S990923	45.97	53.27	9.93	1.44	3
S970401	24.50	16.85	1.51	0.14	1	S991001	38.86	34.04	3.56	0.50	1
S970406	18.00	17.19	0.80	0.15	1	S991010	30.23	34.55	2.27	0.63	1
S970507	63.50	292.06	13.57	2.07	1	S991031	21.84	7.32	0.83	0.14	1
S970512	97.50	302.11	38.89	4.41	1	S000526	23.37	7.49	1.53	0.1	1
S970523	20.00	69.27	1.28	1.09	1	S000610	63.50	1272.93	3.95	3.49	1
S970529	16.50	24.68	2.25	1.50	1	S000626	44.70	97.69	7.29	1.31	1
S970530	18.50	62.80	2.55	1.74	1	S000629	53.85	694.08	14.56	10.56	2
S970625	108.50	828.19	47.32	14.19	1	S000711	18.03	36.93	1.16	0.38	1
S970630	135.50	1035.84	58.77	26.99	1	S000722	303.53	2569.85	187.94	47.46	1
S970704	49.50	130.20	16.11	4.64	3	S000804	58.67	376.65	21.79	10.98	1
S970715	45.50	174.11	11.02	2.94	1	S000820	87.88	323.21	23.70	9.24	2
S970803	108.50	1711.02	60.00	22.43	1	S000823	44.70	45.95	32.31	2.01	3
S970804	122.00	1520.23	85.90	30.36	3	S000825	65.28	126.80	29.37	6.21	3
S970926	15.50	4.43	2.56	0.35	1	S000826	79.76	269.60	42.72	12.31	3
S971013	15.00	45.44	0.77	0.13	1	S000827	29.46	88.84	18.68	6.51	3
S971112	15.50	40.51	0.59	0.13	1	S000831	29.46	30.98	4.37	1.55	3
S971128	24.50	52.25	1.37	0.10	1	S000914	37.85	27.57	7.66	1.02	1
S971206	17.50	32.68	3.80	0.18	1	S000915	68.83	163.56	20.04	4.55	2
S990503	47.50	40.85	2.77	0.33	1	S000916	83.82	140.59	30.09	3.82	3
S990518	38.10	27.06	4.29	0.55	1	Min.	16.26	4.43	0.39	0.03	
						Max.	303.53	2569.85	187.94	47.46	

3. 직접유출량

직접유출량은 경사급변점법에 의하여 기저유출량을 분리하여 구하였다. 경사급변점법에 의하여 분리된 직접유출량은 1996년부터 2000년의 자료기간에

대하여 총 67개 사상이었다. Table 1은 선정된 폭우사상의 강우량과 이에 따른 강우침식성인자, 직접유출량, 그리고 침투유출량을 나타내고 있다. 강우침식성인자는 현장에 설치된 강우계에서 취득한 10분 단위 강우량으로부터 구하였다. 강우량이 가

장 큰 사상은 2000년 7월 22일 폭우로서 303 mm에 달했으며, 1999년 9월 18일 강우가 16 mm로서 가장 작은 값을 보였다.

4. 수질자료

오염원 자료는 생활계, 축산계, 산업계 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지 답사를 통해서 기초자료를 수집하여 정리하였다. 시험구역의 오염원은 봉담읍과 팔탄면 사무소의 자료를 이용하여 인구, 축산, 그리고 산업계를 조사하였다.

수질 표본의 채취는 월 2회를 기준으로 결빙기 후인 3월~11월 기간동안에 정기적으로 실시하였으며, 폭우시에는 수시로 채수하였다. 수질 표본의 분석은 pH, DO, 수온 등은 현장에서 측정하였으며, 부유물질, TN, TP 등의 영양물질, 기타 수질 항목 등은 수질 표본으로부터 실험실에서 정량분석을 실시하였다.

시험구역에서의 오염부하량을 측정하기 위해 하천 측점에서 SS, TN, TP에 대한 오염부하량 (L) 과 유량 (Q)의 회귀식인 L-Q식을 구하였다. 시험구역의 L-Q식은 1996년부터 2000년까지 측정된 자료를 이용하였으며, 특이치는 제외하였다. Table 2는 HP#6 소유역의 L-Q식을 나타내고 있다.

강우 중에 함유된 질소와 인의 채수 및 분석은 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 옥상에서 강우 시료를 받아서 분석하였다.

Table 2 Load-discharge relationships at the HP#6 station

Station	Item (kg/day)	Load-discharge relationship	R ²
HP #6	SS	SS=0.0001Q ^{1.5573}	0.9164
	TN	TN=0.026Q ^{0.8383}	0.9271
	TP	TP=0.0007Q ^{0.9212}	0.9332

Q : Discharge (m³/day)

5. 도형자료 구축

도형자료는 ArcView와 위성영상자료에 의하여 추출된 결과를 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.

도형자료는 분포형 수질모형의 구동을 위해 벡터 맵으로부터 격자형 자료인 그리드 (grid) 자료로 변환하였으며, 위성영상의 분해력인 30 m × 30 m의 그리드 자료를 사용하였으며, 모형의 구동시

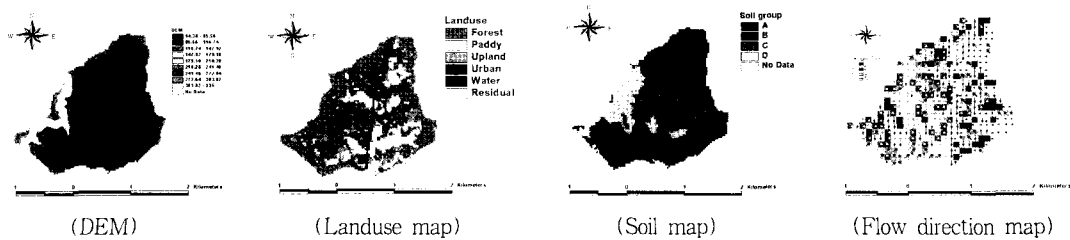


Fig. 3 Results of representing GIS data

100 m × 100 m 격자로 변환하였다.

Fig. 3은 구축된 도형자료인 DEM, 토지이용도, 토양도, 그리고 흐름방향도를 보여주고 있다.

IV. 모형의 적용

1. 강우침식성 인자 비교

본 연구에서는 대상지구의 강우분포형태를 고려하기 위하여 AGNPS 모형에서 사용하고 있는 Trey (1997)에 의한 방법 (Tr1, Tr2, Tr3, Tr4) 뿐만 아니라, Lombardi (1979)가 제안한 방법 (Lom), 강우분포모형인 삼각형 강우분포에 의한 방법 (Tri), 사각형 강우분포에 의한 방법 (Tra), 그리고 Mononobe에 의한 방법 (Mon) 등에 대하여 강우침식성인자를 산정하였다.

Fig. 4는 Trey 방법과 강우분포모형에 의해 추정된 강우침식성인자를 실측치와 비교하여 보여주고 있다. Fig. 4에서와 같이, 강우침식성인자는 Trey 방법과 Yen & Chow 강우분포모형이 실측치의 경향을 잘 나타내고 있다. 그러나 Trey 방법은 Yen & Chow 방법에 의한 계산 결과보다 실측치가 작게 계산되는 경향을 보였다.

Table 3은 강우침식성인자의 산정방법에 따른 결과를 실측치와 비교하여 나타내고 있다. Table 3에서와 같이, 실측치에 대한 산정방법별 상대오차는 17~232%의 비교적 큰 범위를 보였고, RMSE도 307~1299 MJ-mm/ha-h의 큰 범위를 나타내었다. RMAE는 0.55~2.16 MJ-mm/ha-h의 범위를 보였고, 결정계수는 Mononobe 강우분포형에 의한 방법을 제외하고는 0.7~0.83의 범위를 보였다.

이상의 결과로부터 강우침식성인자의 추정은 실측치와 오차가 가장 작고, 실측치의 경향을 잘 나타내고 있는 Yen & Chow의 삼각형 강우분포모형을 선정하였다.

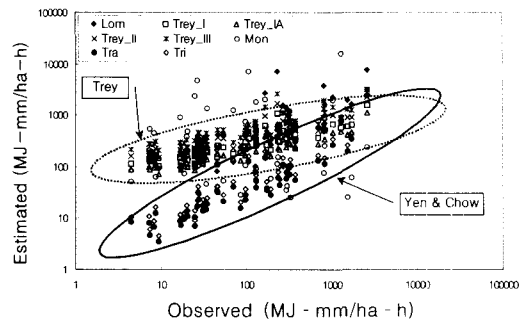


Fig. 4 Observed and estimated rainfall erosivity factor

Table 3 Results of the estimated rainfall erosivity factor

Item	Lom	Tr1	Tr2	Tr3	Tr4	Mon	Tri	Tra
RB (%)	206	18	17	71	141	232	42	55
RMSE*	1299.35	314.81	348.18	359.99	539.55	2382.43	307.56	321.76
RMAE*	2.16	0.78	0.69	1.04	1.54	3.37	0.55	0.57
R ²	0.6997	0.8018	0.8216	0.7758	0.7512	0.007	0.8298	0.8278

*Unit : MJ-mm/ha-h

2. 모형의 보정

본 연구에서는 모형의 보정을 위한 최적화 기법으로 단순시행착오법을 사용하였고, 목적함수로서 RMSE와 RMAE (root mean absolute error), 그리고 모형의 효율지수를 이용하였다. 매개변수 보정을 위한 RMSE와 RMAE는 각각 다음 식 (12)와 식 (13)과 같이 계산한다.

$$\min RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2} \dots (12)$$

$$\min RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)|}{M_o} \dots (13)$$

여기서, Q_o 는 실측값, Q_f 는 모의값, n 은 자료수이다. 모형의 추정 오차를 평가하기 위한 상대오차 (Relative bias, RB)는 다음 식과 같이 계산한다.

$$RB = \frac{M_f - M_o}{M_o} \dots\dots\dots (14)$$

여기서, RB 는 상대오차, M_f 는 추정 유출량의 평균치 (mm), M_o 는 실측 유출량의 평균치 (mm)이다.

모형의 추정 오차를 평가하기 위해서 사용되는 결정계수 (R^2)는 0.0~1.0 범위의 값을 가지며, 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한다. 그러나, 결정계수는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로서 오차의 정도를 나타내지는 못한다. 따라서, 오차의 정도를 나타내기 위해 RMSE와 RMAE 등을 사용하며, RMAE가 RMSE에 비하여 오차의 크기를 더 효율적으로 나타내는 전형적인 지표로 사용된다.⁹⁾

모형의 효율을 평가하기 위해서 사용한 효율지수는 Nash와 Sutcliffe (1970)¹⁰⁾에 의해 제안되었으며, 다음 식과 같이 계산한다.

$$EI = (ST - SE) / ST \dots\dots\dots (15)$$

$$ST = \sum_{i=1}^N (M_o - Q_o)^2 \dots\dots\dots (16)$$

$$SE = \sum_{i=1}^N (Q_o - Q_f)^2 \dots\dots\dots (17)$$

여기서, Q_o 는 실측치, M_o 는 실측치의 평균, Q_f 는 모의치이다. 식 (5-5)에서 ST 는 실측치의 초기 분산 (initial variation)을 나타내며, SE 는 실측치와 모의치의 불일치 (index of disagreement)를 나타낸다. EI 는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 계산된 EI 가 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다.^{10),13)}

가. 유출량

AGNPS 모형의 유출량에 대한 보정은 직접유출량에 대해서 가장 변위가 크게 나타나는 CN값을

대상으로 하였다. SCS에서는 CN값을 선행토양함수조건 (Antecedent soil moisture condition, AMC)에 따라 CN I, CN II, 그리고 CN III 조건으로 구분하고 있다.

HP#6 소유역의 평균 CN값은 CN I, CN II, 그리고 CN III가 각각 64, 77, 그리고 86으로서 큰 변위를 보였다. AMC 조건을 성수기 기준으로 하여 CN값을 적용한 결과, 실측 유출량보다 모의 유출량이 작게 나타났다. 또한, 비성수기에 해당되는 5일 선행강우량을 기준으로 적용한 결과 역시 모의치가 실측치에 비하여 작게 추정되었다. 따라서,

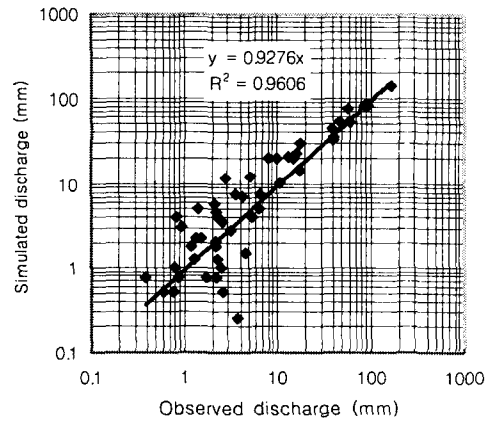


Fig. 5 Observed and simulated runoff

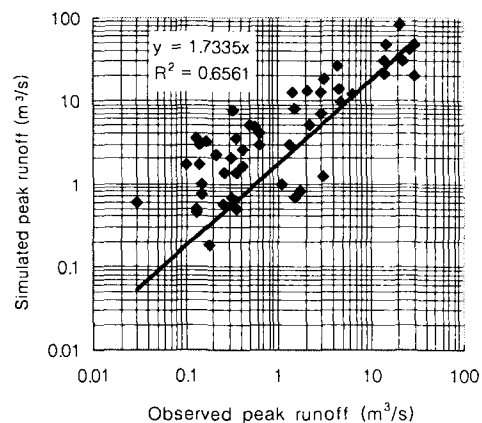


Fig. 6. Observed and simulated peak runoff rates

AMC I 조건을 AMC II 조건으로 변환하여 적용하였다. Fig. 5는 AGNPS 모형의 직접유출량을 보정하여 모의한 결과와 실측치와의 비교 결과를 보여주고 있다. 침투유량의 보정은 직접유출량의 보정에 의해 이루어졌으며, Fig. 6은 침투유량의 보정 결과를 보여주고 있다.

나. 유사량

유역의 유사량은 유역의 하천유량과 그에 따른 유사농도로부터 구한 부유사량이다. 폭우시 부유사 농도는 폭우사상 전체의 부유사 농도를 대표하지 못하므로 단일 폭우사상에 대하여 샘플링된 한 두 점의 부유사 농도를 이용하여 유사량을 계산하는 것은 오차의 변위가 크게 나타날 우려가 있다. 따라서, 본 연구에서는 유량의 변화에 따른 유사량의 관계를 나타내는 유사량-유량 관계식을 이용하여 실측 유사량으로 사용하였다.

Kim (1995)과 Cho (1998) 등의 선행 연구 결과에 의하면 GIS 상에서 경사장을 산출할 경우 산림지의 경사장이 과다 추출되어 유사량이 크게 모의된다고 하였다. 따라서 유사량에 대한 모형의 보정은 격자별 경사장을 경사도에 따라서 0.1배를 취하여 모의하였다.

Fig. 7은 모형의 보정에 의한 유사량의 모의치와

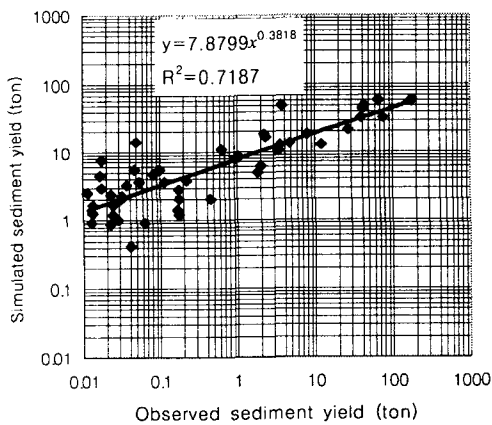


Fig. 7 Observed and simulated suspended solids at the HP#6 watershed

실측치를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 7에서와 같이, 고수위에서는 모의치와 실측치가 유사한 값을 보였으나, 전체적으로 실측치에 비하여 모의치가 큰 값을 나타냈으며, 결정계수는 0.72였다.

다. 영양물질

AGNPS 모형에 의한 총질소와 총인의 모의는 주거지에서의 생활하수와 가축분뇨를 점원오염으로 처리하여 수행하였다. HP#6 소유역에서는 가축분뇨를 톱밥발효로 처리하고 있었으며, 밭에 퇴비가 이루어지고 있었다.

점원오염의 처리는 Case I과 Case II로 설정하였다. Case I은 환경부에서 제시하고 있는 톱밥발효의 처리율인 20%를 기준으로 한 경우이다. Case II는 HP#6 소유역의 축산농가들이 소농이고 별도의 처리시설을 갖추지 않는 것으로 조사되었으므로 배출부하량을 발생부하량의 처리율 10%로 적용한 경우이다.

총질소와 총인의 실측치는 유사량에서와 동일하게 부하량-유량 관계식을 이용하여 계산한 영양물질 부하량으로 하였다.

Fig. 8~Fig. 11은 Case I과 Case II인 경우에 각각 영양물질인 총질소와 총인의 모의 결과를 실측치와 비교하여 보여주고 있다. Case I의 총질소

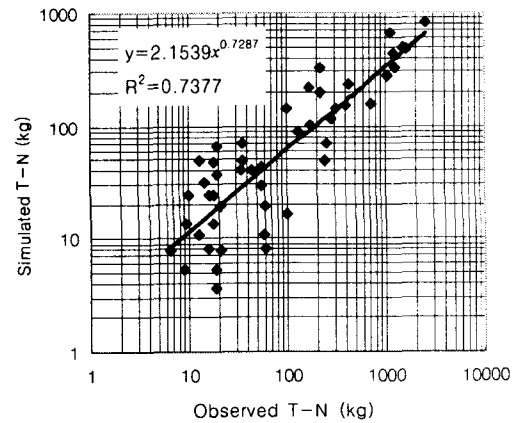


Fig. 8 Observed and simulated TN of Case I

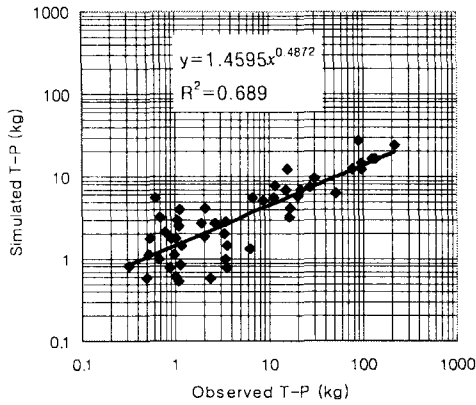


Fig. 9 Observed and simulated TP of Case I

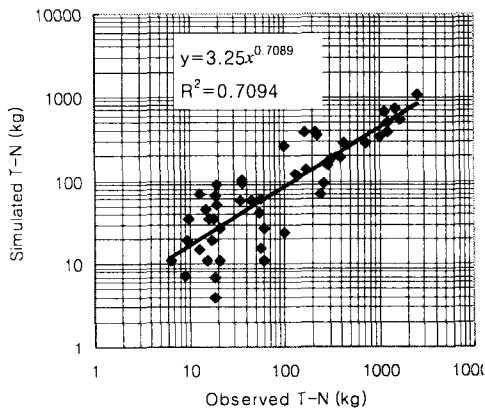


Fig. 10 Observed and simulated TN of Case II

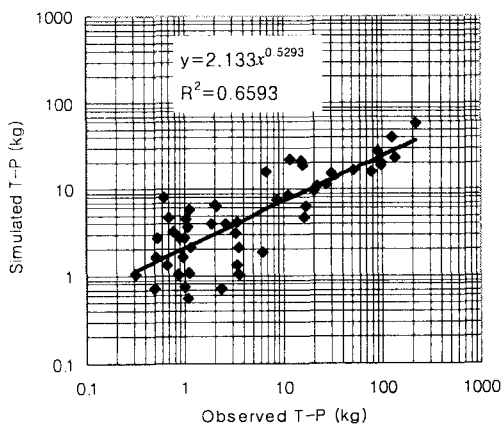


Fig. 11 Observed and simulated TP of Case II

와 총인의 결정계수는 각각 0.74과 0.69의 값을 보였고, Case II의 경우에는 총질소와 총인이 0.71과 0.66의 값을 나타냈다.

Case I과 Case II의 모의 결과를 비교해볼 때, Case I의 결정계수가 높은 값을 보임으로 실측치와의 상관성은 다소 높은 것으로 나타났으나, 실측치보다 모의치가 전체적으로 작게 모의되었다. 따라서, 결정계수가 다소 작더라도 실측치와 보다 근접한 값을 보이는 Case II를 채택하는 것이 타당할 것으로 보인다.

3. 모형의 검정

모형의 검정은 이미 보정된 매개변수가 동일 유역 및 보정에 이용되지 않은 자료기간에 대해서 얼마나 일관된 결과를 모의하여 주는가를 평가하는 것이다. 모형의 검정은 보정에 이용하지 않았던 2000년 자료에 대하여 실시하였다.

Fig. 12~Fig. 16은 HP#6 소유역의 2000년 자료에 대한 유출량, 침투유량, 유사량, 총질소, 그리고 총인에 대한 모형의 모의치와 실측치를 보여주고 있다. 모형의 검정 결과, 유출량과 침투유량의 결정계수는 0.97과 0.90으로 나타났고, 유사량은 0.72, 총질소는 0.70, 그리고 총인은 0.71이었다.

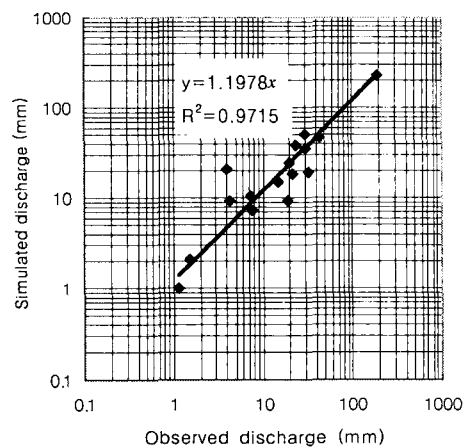


Fig. 12 Observed and simulated runoff

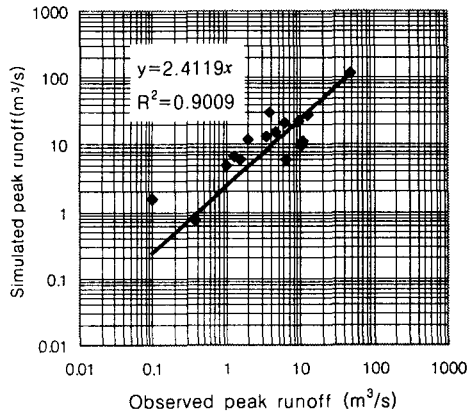


Fig. 13 Observed and simulated peak runoff rates

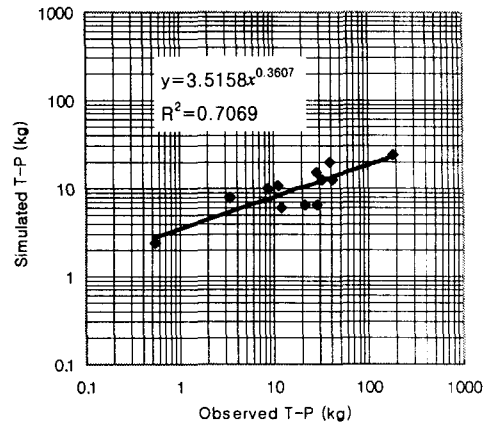


Fig. 16 Observed and simulated TP

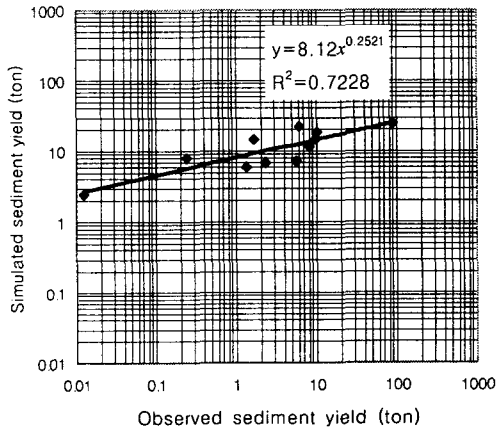


Fig. 14 Observed and simulated suspended solids

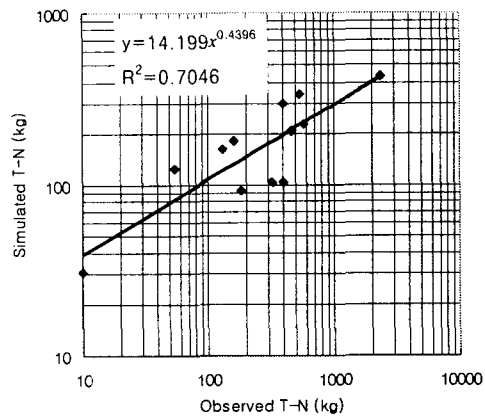


Fig. 15 Observed and simulated TN

유사량과 영양물질은 실측치에 비하여 모의치가 큰 값을 보임으로서 모형의 보정에서와 유사한 결과를 나타냈다.

4. 모형의 평가

모형의 보정과 검정에 대한 평가는 모형의 보정에 사용된 목적함수인 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE), 상대평균절대오차 (Relative mean absolute error, RMAE), 그리고 효율지수 (Efficiency index, EI) 등의 통계적인 변량을 사용하였다.

Table 4는 유출과 수질 항목별 모형의 모의 결과에 대한 통계적인 변량을 나타내고 있다. 유출량은 모형의 보정과 검정에 대하여 각각 상대오차가 4.22%와 19.68%, RMSE가 6.34 mm와 13.45 mm, RMAE가 0.23 mm와 0.32 mm, EI가 0.96과 0.90, 그리고 결정계수가 0.96과 0.97로 나타났다. 모형의 모의결과는 실측 유출량의 경향성과 크기를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 침투유출량은 유출량에 비하여 오차의 정도가 크게 나타났으며, 모형의 효율지수는 음의 값을 나타내었다. 실측치와 모의치의 경향성을 나타내는 R^2 는 보정과 검정에 있어서 0.66과 0.90의 값을 보였다. 본 연

Table 4 Calibrated and verified results from AGNPS model simulation at the HP#6 watershed

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

구의 주목적이 오염총량을 산정하여 비점원오염부하량의 기여율을 추정하기 위한 것이므로 침투유량 보다는 유출량의 정확도나 경향성이 그 의미가 있다고 할 수 있다.

유사량은 모형의 보정과 검정에 있어서 비교적 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 유사량은 상대오차가 12.38%와 59.13%, RMSE가 19.98ton과 21.07ton, RMAE는 0.82ton과 0.99ton 그리고 EI가 0.53과 0.27인 것으로 나타났다.

총질소는 모형의 효율지수의 범위가 보정의 경우는 0.53, 검정의 경우에는 0.05였고, 결정계수는 0.70의 값을 보였다. 총인은 총질소에 비하여 다소 떨어지는 결과를 보였고, 모형의 검정의 경우에는 모형의 효율지수가 음의 값을 보였다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 RS와 GIS-AGNPS 모형을 이용하여 소유역에서의 오염부하량을 추정하기 위하여, 발안저수지 유역의 HP#6번 소유역을 시험유역으로 선정하여 유역수문, 수질특성을 조사하였고,

AGNPS 모형의 입력자료 구축을 위한 도형자료를 추출하였으며, 이를 바탕으로 AGNPS 모형을 적용하여 오염부하량을 추정하고, 그 결과를 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유역 규모의 비점원오염부하량을 추정하기 위해서 카테고리 분류 인공신경망모형과 비점원오염모델인 AGNPS 모형을 이용하여 RS와 GIS-AGNPS 호환모형을 개발하였다.

2. 대상지구인 발안유역의 HP#6 소유역을 대상으로 기상, 수문인자, 토지이용과 토양, 오염원인자, 강수수질, 영농상황, 인문·사회환경조사 등의 비점원오염부하량의 추정 및 평가를 위한 제요소를 종합적, 체계적으로 모니터링 하였다.

3. NGIS 및 RGIS 수치지도와 정밀토양도 등을 이용하여 소유역 수치표고모델, 수계망도, 경사방향도, 토양도 등을 구축하였고, Landsat TM 영상을 대상으로 토지이용도를 작성하였다. 이로부터 유출곡선번호도, 토양유실관련 인자도 등을 추출하였다.

4. 강우분포모형을 적용하여 강우침식성인자를 산정한 결과, Trey 방법과 Yen & Chow 강우분포모형이 실측치의 경향을 잘 나타냈으며, Yen & Chow의 삼각형 강우분포모형은 실측치와 오차가 가장 작고, 실측치의 경향을 잘 나타냈다.

5. 1996년에서 2000년까지 총 67개 폭우사상에 대하여 AGNPS 모형을 적용하여 보정 및 검정을 수행하였다. 유출량의 보정과 검정의 RB는 각각 54.22%와 19.68%, RMSE는 6.34 mm와 13.45 mm, RMAE는 0.23 mm와 0.32 mm, EI는 0.90와 0.96, 그리고 결정계수는 0.96과 0.97의 값을 나타냄으로서 실측 유출량의 경향성과 크기를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

6. 유사량과 총질소의 보정과 검정에서는 EI가 모두 양의 값을 보였고, 결정계수도 0.70 이상의 값을 보임으로서 AGNPS 모형의 적용성이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 총인의 경우에는 모형의 보정의 경우 EI가 양의 값이고 결정계수가 0.69였으나 모형의 검정에 있어서는 결정계수가 0.71로

서 그 경향성이 보정의 경우보다 더 나은 결과를 보였다.

7. AGNPS 모형의 통계적 변량을 이용한 평가 결과, AGNPS 모형은 소유역에서의 비점원오염부하량의 정량적 추정이 가능할 것으로 보인다.

References

1. Cho, J. P. 1998. Applications of AGNPS model with rural watersheds having complex land use characteristics. Degree of Master Diss. Seoul National University. (in Korean)
2. 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. (in Korean)
3. Jackson, T. J., R. M. Ragan, and W. N. Fitch, 1977. Test of Landsat-Based Urban Hydrologic Modeling, *J. Water Resour. Plann. Manage. Div., ASCE* 103 (WR1): 141-158.
4. Jensen, J., 1996. *Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.
5. 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. (in Korean)
6. Kim, J. H. 1998. Application of the SWAT/GRASS Model Using a GIS. Degree of Master Diss. Seoul National University. (in Korean)
7. 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. (in Korean)
8. Kim, N. W. 2000. Analysis of Temporal Variations of Determining the Local Design Storms. Ministry of Construction and Transportation. (in Korean)
9. Maidment, David R., et al., 1992. *Handbook of Hydrology: Chap. 24 Remote Sensing*, McGraw-Hill.
10. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of Principles, *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
11. Paola, J. D., and R. A. Schowengerdt, 1995. A Detailed Comparison of Backpropagation Neural Network and Maximum-Likelihood Classifiers for Urban Land Use Classification, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 33, NO. 4*, pp: 981-996.
12. Park, S. W. 2000. Monitoring Agricultural Nonpoint Source Pollution Loadings from Land Uses and Treatments - A case Study at the Banwol Reservoir Watersheds -, 1-5. Suwon, Gyeonggi. : NICEM. (in Korean)
13. Singh, V. P., 1995. Computer models of watershed hydrology, *Water Resources Publications*, p. 1130.
14. 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.