

토지이용의 변화가 홍수유출에 미치는 영향분석

Analysis of Runoff Impact by Land Use Change

- Using Grid Based Kinematic Wave Storm Runoff Model (KIMSTORM) -

김성준* / 박근애** / 전무갑***

Kim, Seong Joon / Park, Geun Ae / Chun, Moo Kab

Abstract

The purpose of this study is to assess the quantitative effect of stream discharge due to land use changes. The upstream watershed of Pyeongtaek gauging station of Anseong-cheon (592.6 km²) was adopted. To accomplish the purpose, firstly, trace land use changes for the selected watershed which have some changes of land use by using Landsat images of 1986 and 1999 of the watershed and secondly, analyse the quantitative effect of stream discharge due to land use changes by applying GIS-based distributed hydrologic model KIMSTORM. The model was calibrated and verified at 2 locations (Pyeongtaek and Gongdo) by comparing observed with simulated discharge results for 7 storm events from 1998 to 2003. Model output was designed to provide information of land use impact on runoff components in the watershed and the sensitivity of impact level of each land use category on storm runoff. Land use impact was evaluated with the land use data sets for 1986 and 1999 for the same rainfall condition (160.5 mm). Area decrease of 4.8 percent of forest and 4.0 percent of paddy field during 13 years (1986 - 1999) within the watershed caused a 30.3 percent increase of peak runoff and a 9.3 percent increase of runoff volume.

keywords : land use change, runoff impact, KIMSTORM, distributed model

요 지

본 연구는 안성천의 평택수위관측소 상류유역을 대상으로 점진적인 도시화로 인한 토지피복변화가 수문변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 1986년과 1999년 Landsat TM 영상을 사용하여 최우도법에 의해 토지피복도를 작성하였으며, 토지이용의 변화에 따른 하천유출량의 정량적 변화를 모의하기 위해서는 격자기반의 분포형 강우유출모형인 KIMSTORM 모형(김성준 등, 1998)을 사용하였다. 1998년에서 2003년까지 총 7개의 강우사상을 선정하여 평택과 공도 두 지점에 대하여 모형을 보정 및 검증하였다. 1986년을 기준으로 1999년에 대한 하천유출량 변화는 유역내 4.8%의 산림면적과 4.0%의 논면적이 감소한 상태에서, 160.5mm의 강우조건에서 평택수위관측소 지점의 첨두유출량이 30.3%, 총유출량은 9.3% 증가한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 토지이용변화, 유출영향, KIMSTORM, 분포형 모형

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Konkuk Univ., Seoul 143-701, Korea
(e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)

** 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Rural Engrg., Konkuk Univ., Seoul 143-701, Korea

*** 농업기반공사 부장
Team leader, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation

1. 서 론

지난 수십년 동안 농촌지역에서는 벌채, 개간 등에 의한 산림의 변화, 주거지 조성, 논 경지정리, 밭개간 등에 의한 토지이용의 변화, 지하수 개발, 논내 비닐하우스 재배 등에 의한 물이용 형태의 변화 등 꾸준한 변화가 지속되어 왔다.

유역의 상류인 산림면적의 감소는 수자원 함양량 및 생태계 측면에서 변화가 있음이 틀림없다. 한편 토지이용의 변화는 강우시 유출의 변화와 직결된다. 농촌유역의 주거지 조성은 이전의 지표면이 갖고 있었던 보수 및 우수 기능 등이 건물이나 아스팔트, 콘크리트 포장으로 피복되면서 현격하게 줄어들고, 산림지역의 꾸준한 개발 및 밭 개간으로 인한 토지이용의 변화에 따라 이들 지역에서 하천으로 유입되는 홍수 유출량이 이전보다 증대되고 유역 출구점까지의 도달시간은 단축됨으로써 침투 유량이 증가하게 되었다. 특히 논 면적의 꾸준한 감소추세는 기존에 논이 가지고 있었던 저류효과가 하천유량에 변화를 주고 있다고 판단된다. 이와 같은 현상은 해당유역의 치수대책 및 하천정비계획에 직접적으로 영향을 미치게 되므로, 토지이용의 변화에 따른 수문학적 변화를 정량적으로 구명하여야만 효율적인 유역관리에 능동적으로 대처할 수 있을 것이다.

기존의 강우-유출해석을 위한 자료 구축은 해당유역의 지형도나 기타 도면들과 현장에서 관측한 자료들을 토대로 수작업 및 간단한 연산을 통해 이루어졌다. 그러나, 이러한 방법들은 많은 시간과 노력이 필요로 하며, 그 효율성과 결과에 대한 신뢰도 역시 낮다는 문제점을 가지고 있다. 이에 GIS (Geographical Information System)의 응용범위가 확대되면서 수자원분야에 있어서도 GIS를 이용하여 효율적으로 수자원을 관리하기 위한 다양한 기술 및 수문모형들이 개발되고 있다. 하드웨어의 그래픽 성능이 모델의 입력과 출력을 쉽게 가시화할 수 있게 되면서 1990년대부터는 WMS HEC-1, BASINS-SWAT, CASC2D, KIMSTORM 등과 같이 포괄적인 그래픽 사용자환경을 제공하는 시스템의 개발도 병행되고 있다.

RS (Remote Sensing)는 최근 들어 위성영상의 공간적, 분광적 해상도의 다양화와 더불어 영상처리기술의 획기적인 발전에 의해 현지측량이나 항공측량, 그 밖의 방법 등에 의한 것보다 넓은 지역을 빠른 시간에 효율적으로 처리하여 수문모형의 필수입력자료인 토지이용도를 작성할 수 있게 되었고, 주기적 데이터 획득에 의한 정보갱신과 수치화, 시계열 분석에 용이하다는 장점을 이용함으로써 과거 수십년간의 인공위성

영상자료를 이용한 토지이용의 경년변화 추정이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 과거 꾸준히 논면적의 변화가 진전된 안성천 평택수위관측소 상류유역을 대상으로 Landsat TM 영상으로 분석된 1986년과 1999년의 토지피복 분석결과와 구축된 GIS자료(수치고도모델, 하천도, 토양도 등)를 기반으로, GIS기반의 수문모형을 이용하여 GRID 해석에 따른 토지이용의 변화가 하천유출 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 KIMSTORM 모형

본 연구에서 적용한 분포형 강우유출모형은 김성준(1998) 및 김성준 등(1998)이 개발한 KIMSTORM (Grid-based KIneMatic Wave STOrM Runoff Model)으로서, 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 수문정보를 입력하여 격자별 물수지를 계산하므로써 유역의 전반적인 시간적·공간적 수문량을 파악하도록 하는 모형이다.

지표흐름은 운동파(kinematic wave) 이론을 적용하였다. 지표흐름은 얇은 면흐름(shallow sheet flow), 하천흐름은 직사각형 수로인 조건에서 흐름상태는 완전난류로 가정하고 Manning식을 사용하였다.

$$Q_{sur} = \alpha R^{m1} A_{sur}^{m2} \quad (1)$$

여기서 Q_{sur} = 지표유량(m^3/sec), R = 동수반경, A_{sur} = 흐름단면적(m^2), α , $m1$, $m2$ = 상수이다. 식 (1)에서

지표흐름의 경우, $\alpha = \frac{\tan^{1/2}\beta}{nw^{2/3}}$, $R = h = A_{sur}/w$, $m1$

= 0, $m2 = 5/3$, n = Manning조도계수, β = 격자 경사 각(degree), w = 격자 폭(m), h = 흐름깊이(m)이며, 하

천흐름의 경우는 $\alpha = \frac{\tan^{1/2}\beta}{n}$, $R = \xi A_{sur}^{1/2}$, $\xi =$

0.354(Moore and Burch, 1986; Moore and Foster,

1990), $m1 = 2/3$, $m2 = 1$ 이다. 지표하 흐름도 운동파

가정에 의하여 다음의 운동량 방정식을 적용하였다

(Beven, 1982; Sloan and Moore, 1984).

$$Q_{sub} = K_s A_{sub} \sin \beta \quad (2)$$

여기서 Q_{sub} = 지표하유량(m^3/sec), K_s = 포화투수계수(m/sec), A_{sub} = 흐름단면적(m^2)이다. 침투는 Huggins

& Monke식을 적용하였으며, 식은 다음과 같다. 침투 즉 지하수유출은 토양수분이 포장용수량 이상일 경우에 최종침투율로 배제되는 것으로 가정하였다.

$$f = f_c + f_o \left(\frac{SM_r}{PO_e} \right)^b \quad (3)$$

여기서 f = 침투율(mm/hr), f_c = 최종 침투율(mm/hr), f_o = 초기 침투율(mm/hr), SM_r = 잉여저류능(m^3/m^3), PO_e = 유효공극율(m^3/m^3), b = 상수이다. 초기 토양수분은 토양의 물리적인 특성인 공극율, 포장용수량 및 토양깊이를 사용하면 토양수분의 상태에 따라 유출심의 함수로 표현할 수 있다. 각 격자에서의 초기유출심은 다음과 같이 계산할 수 있으며, 유역 경계에 위치하는 격자의 초기유출심은 0 으로 가정한다.

$$\begin{aligned} H_{ini} &= D_c(SM_{ini} - F_c)/(PO_e - F_c), & F_c < SM_{ini} < PO_e \\ &= D_c, & SM_{ini} \geq PO_e \\ &= 0, & SM_{ini} \leq F_c \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 H_{ini} = 초기유출심(m), D_c = 토양깊이(m), SM_{ini} = 초기토양수분(m^3/m^3), F_c = 포장용수량(m^3/m^3)이다. 물수지는 각 격자별로 계산되며, 임의 시간에 계산된 격자별 물수지 결과는 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음 시간으로 전달되어 각 격자의 변화를 추적하게 된다. 격자에서의 지표면 저류량과 토양수분 변화량이 각각 계산되며 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dS_i}{dt} &= P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{sur.in.i} - Q_{sur.out.i} \\ &\text{for overland flow} \\ &= P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{sur.in.i} + \sum Q_{sub.in.i} - Q_{sur.out.i} \\ &\text{for stream flow} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 i = 격자 주소, S_i = 격자 저류량(m^3), P_i = 강우량(m^3/sec), F_i = 침투량(m^3/sec), $Q_{sur.in.i}$ = 주위격자로부터의 지표면 유입량(m^3/sec), $Q_{sur.out.i}$ = 계산격자에서의 지표면 유출량(m^3/sec)이다. 한편 해당격자가 하천인 경우는 주위격자로부터의 지표면 유출량이 하천격자로 유입되는 것으로 하였다.

$$\frac{dSM_i}{dt} = F(t)_i + \sum Q_{sub.in.i} - Q_{sub.out.i} - DP(t) \quad (6)$$

여기서 SM_i = 격자 토양수분(m^3), $Q_{sub.in.i}$ = 주위격자로부터의 지표면 유입량(m^3/sec), $Q_{sub.out.i}$ = 계산격자에서의 지표면유출량(m^3/sec), DP_i = 지하수 유출량(m^3/sec)이다.

모형의 입력자료로는 유역의 수치고도모델, 흐름방향도, 하천도, 토양도, 토지이용도, 티센망도(또는 공간강우분포도)를 사용한다. 이 모형은 C-언어로 작성되었으며, 입력자료를 격자기반(grid-based)의 GRASS를 이용하여 ASCII 형식의 파일로 불러들인다. 모형은 수행되면서 유역의 시간적·공간적 유출심, 유출량, 토양수분 분포도 등을 주어진 시간간격으로 ASCII 파일형식의 도면으로 출력하며, 원하는 지점에서의 유출곡선을 텍스트 파일로 출력한다. 이들 결과는 격자기반 GIS 소프트웨어의 형식으로 전환시켜 그래픽으로 표현이 가능하다.

2.2 대상유역 및 수문자료

안성천의 평택 수위관측소를 유역출구로 하는 상류 유역을 대상으로 하였으며, 유역면적은 592.6km²이며, 주하천의 유로연장은 76km이다. 행정구역상으로는 안성시와 천안시가 각각 62.5%, 28.5%를 차지하는 이 지역은 지난 20여년간 공단, 택지 조성 등의 도시화에 따라 산림지역과 농경지가 감소하는 등 유역내 토지이용의 변화가 꾸준히 진전된 지역이다.

유역을 지배하는 기상관측소는 총 8개(Fig. 1)로 구성되었으며, 모형의 적용성을 검토하기 위하여 총 7개의 강우사상(Table 1)을 대상으로 유역내 공도 및 평택 수위관측소의 시간수위자료를 이용하였다.

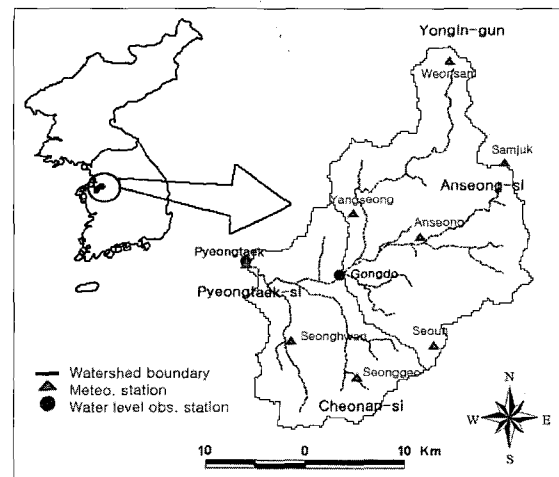


Fig. 1. Anseong-cheon watershed

Table 1. Summary of 7 selected rainstorm characteristics

Storm events	Thiessen average rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Max. rainfall intensity (mm/hr)
1998/8/08 - 1998/8/13	206.6	32	31.0
1999/8/02 - 1999/8/05	238.3	44	23.8
2000/8/23 - 2000/9/06	344.0	263	31.5
2000/9/12 - 2000/9/24	209.0	96	10.4
2001/7/29 - 2001/8/04	103.8	124	18.8
2003/8/19 - 2003/8/22	64.5	51	11.6
2003/9/06 - 2003/9/12	80.9	83	17.0

2.3 RS를 이용한 토지피복 변화도 작성

연구대상지역의 토지이용 변화를 파악하기 위하여 1986년 4월 15일과 1999년 4월 19일의 Landsat TM 영상을 선정하였다. Spheroid Bessel, Datum Tokyo (Korea), Projection UTM-52N으로 투영하여 기하보정이 되어있는 1999년 영상의 교량, 댐, 항만, 방조제와 같이 위치변동이 없는 지점을 지상기준점(GCP; Ground Control Point)으로 선정하고 1986년 영상자료의 동일 지점에 지상기준점을 지정함으로써 두 영상의 동일 지점에 같은 좌표체계를 갖도록 Image to image 방법으로 기하보정 처리하였다. 이때 좌표변환은 다항식 방정식을 사용하였고, 재배열은 근접된 2x2 격자의 화소 값들을 거리가중 평균하는 공일차내삽법을 사용하였으며, 기하보정에 의한 RMSE는 0.28~0.53pixel의 범위를 보였다.

Landsat TM 영상의 6개 band 중에서 본 연구에서는 밴드별 분류항목의 DN (digital number)값의 분포를 고려하여 항목별 DN값의 편차를 보이는 band (식생 형태, 생장, 함수량과 토양 함수량의 지표가 되는 4, 5 band와 식생 구별에 탁월한 3 band)를 조합하여 최대 우도(maximum likelihood) 감독분류법으로 토지피복을 실시하였다. 토지피복을 위한 분류항목은 Landsat TM의 공간해상도와 SCS-CN의 분류항목을 고려하여 총 7개(1.산림, 2.논, 3.밭, 4.주거지, 5.초지, 6.나지, 7.물)의 항목을 선정하였다. Fig. 2는 1986년과 1999년에 대한 연구대상 지역의 토지피복 분류결과를 도시한 것이며, 이에 대한 토지이용 항목별 면적변화를 Table 2에 정리하였다. 토지이용의 변화를 보면, 도시 및 주거지역이 1986년 3.3%에서 1999년에 9.3%로 6.0% 증가하였으며, 산림과 논은 1986년에 46.3%, 26.5%에서 1999년에는 41.5%, 22.5%로 각각 4.8%, 4.0%가 감소하였다.

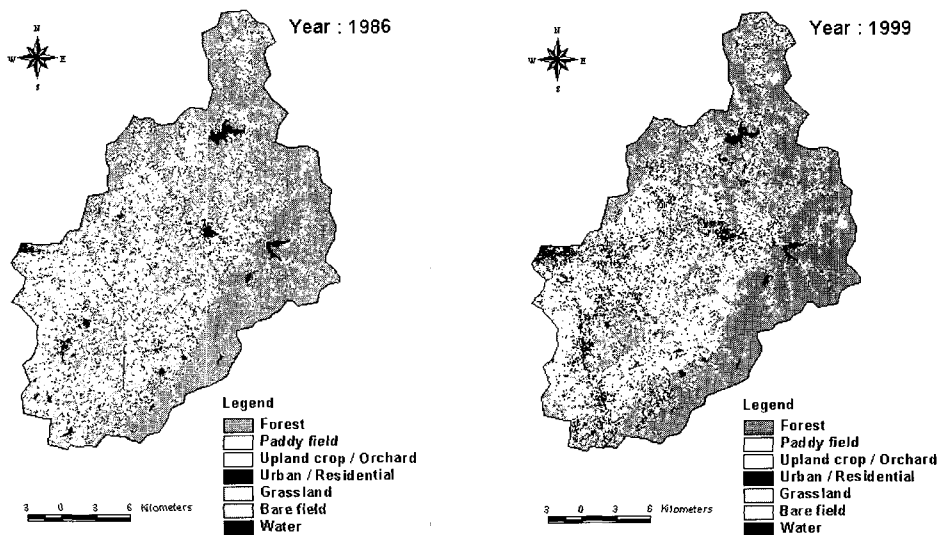


Fig. 2. Classification results of land cover for 2 selected years (1986, 1999)

Table 2. Summary of land cover changes of 7 items for 2 selected years (1986, 1999)

Items	Area (km ²)		Ratio of Area (%)	
	1986	1999	1986	1999
1. Forest	274.6	246.2	46.3	41.5
2. Paddy field	157.3	133.6	26.5	22.5
3. Upland crop / Orchard	69.6	78.0	11.7	13.2
4. Urban / Residential	19.8	55.2	3.3	9.3
5. Grassland	53.5	60.2	9.0	10.2
6. Bare field	11.0	14.1	1.9	2.4
7. Water	6.8	5.3	1.1	0.9
Total	592.6	592.6	100.0	100.0

2.4 분류 결과의 정확도 검증

분류정확도의 1차적인 평가로서 위성영상 자료의 분류결과를 객관적이고 정확하게 평가하고자 하는 가장 일반적인 방법 중의 하나인 오차행렬(error matrix)을 이용하였으며, 또한 순수하게 바르게 분류된 화소만을 고려하여 정확도를 평가하고자 하려는 의도에서 도입된 통계량인 Kappa 계수로 정확도를 확인하였다. Table 3에 그 결과 값을 정리하였다.

분류정확도의 2차 평가로서 안성시의 행정구역별 지적통계자료(안성시, 1987, 2000)와의 비교를 실시하였다. 통계자료의 분류체계가 본 연구의 분류체계와 다르므로

적절한 항목끼리 묶을 필요가 있었다. 상·대지와 도로를 합쳐 시가화 지역으로 하고, 전과 과수원을 합쳐 밭 지역으로 하여 상호 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 산림지역은 1.9~9.2% 범위의 절대오차를 보였고, 논 밭/과수원, 및 도시/주거지는 5.0% 미만의 절대오차로 분류되었음을 알 수 있다. 주요 오차의 원인으로, 산림지역은 골프장으로 건설 중인 지역이 분류시에는 나지로 분류되는 반면에 통계자료에서는 산림으로 처리되었으며, Landsat TM의 지상해상도(30m)로는 산림과 논사이의 지역에 산재해 있는 밭의 구분이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

Table 3. Accuracy assessment using error matrix and Kappa coefficient

Date	Overall accuracy (%)	Kappa coefficient
April 15, 1986	98.58	0.98
April 19, 1999	92.08	0.90
Average	94.72	0.93

Table 4. Comparison of statistical data and land cover classification results for Anseong administration boundary

Land cover item		Area (km ²)		Ratio of Area(%)	
		1986	1999	1986	1999
Forest	Statistics	301.2	294.0	54.5	53.1
	This study	250.6	256.2	45.3	46.3
	Abs. error	50.6	37.8	9.2	6.8
Paddy field	Statistics	127.6	123.0	23.1	22.2
	This study	137.6	99.5	24.9	18.0
	Abs. error	10.0	23.5	1.8	4.2
Upland crop / Orchard	Statistics	64.5	58.4	11.7	10.5
	This study	92.4	50.8	16.7	9.2
	Abs. error	27.9	7.6	5.0	1.3
Urban / Residential	Statistics	22.7	34.0	4.1	6.1
	This study	24.5	44.1	4.4	8.0
	Abs. error	1.8	10.1	0.3	1.9
Total area	Statistics	552.8	554.2	100	100
	This study	553.4	553.4	100	100

2.5 GIS자료의 구축

유역경계도는 WAMIS(Water Resources Management Information System)의 수자원단위지도에서 제공하는 유역경계도를 이용하였다. 수치고도모델(DEM)은 1:5,000 NGIS 수치지도로부터 지형관련 레이어인 7111(주곡선), 7114(계곡선), 7217(표고점), 7311(삼각점)을 추출하고 ARC/INFO를 이용하여 Coverage, TIN(Triangulated irregular network), Lattice변환과정을 거쳐 격자간격 30m의 DEM을 생성하였다. 하천도는 1:5,000 수치지도로부터 생성된 DEM을 이용하여 추출하였다(Fig. 3). 토양도는 농촌진흥청 토양물리과에서 제작한 벡터 커버리지 형태의 1:50,000 개략토양도를 이용하여 Fig. 4와 같이 토양종류별 분포도를 작성하였다. 강우관측소는 대상유역을 지배하는 강우관측소의 위치

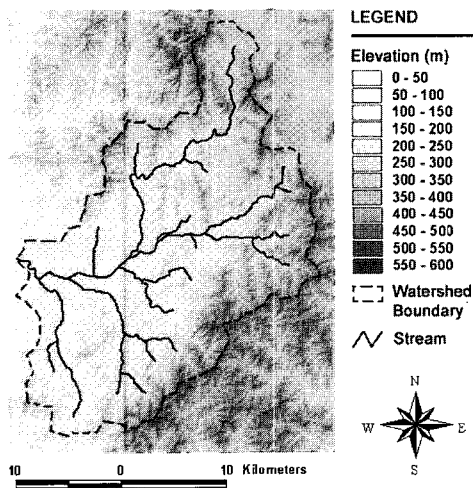


Fig. 3. DEM and stream network of the study watershed

좌표를 이용하여 벡터형태의 점 데이터로 구축하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모형의 보정 및 유역평균 매개변수 결정

본 모형의 효과적인 실행을 위하여 격자 하나의 크기는 200×200m로 재배열하여, 행 193×열 165의 격자상태에서 수행하였다. 모형의 계산시간간격은 1분으로 하였고, 출력은 1시간 간격으로 지표유출 및 하천유출 분포도, 토양수분 분포도 등을 자동 생성시켰다. 본 연구에서의 토양 매개변수들은 Rawls 등(1982)의 자료를 인용하였으며, 이를 정리하면 Table 5와 같다.

모형의 검보정을 위한 실측 하천유량자료와의 비교는 본 유역내의 공도 및 평택 수위관측소(Table 6) 자료를 대상으로 하였다.

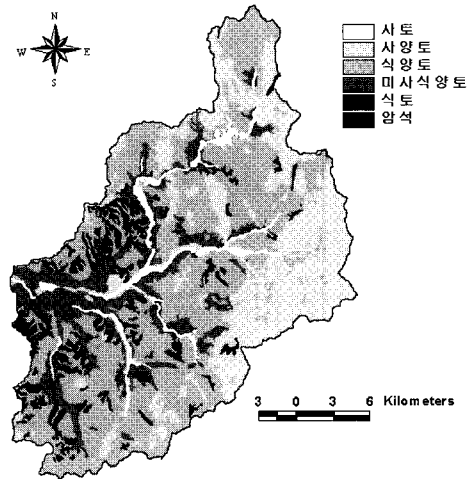


Fig. 4. Soil map

Table 5. Soil parameters adopted in this study

Soil type Parameters	Sand	Sandy loam	Clay loam	Silty clay loam	Clay	Rocky
POe	0.417	0.412	0.390	0.432	0.385	0.417
Fc	0.091	0.207	0.318	0.366	0.396	0.091
Dc (m)	0.20	0.75	1.0	1.0	1.0	0.2
Ks (m/day)	5.04	0.622	0.055	0.036	0.0144	5.04

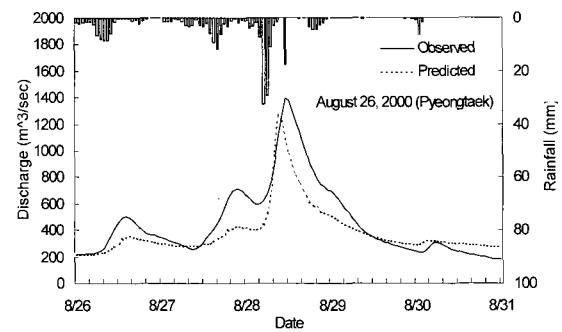
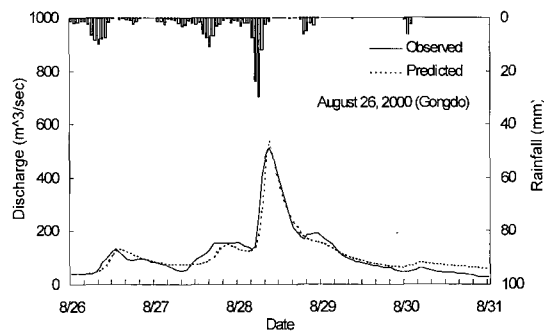
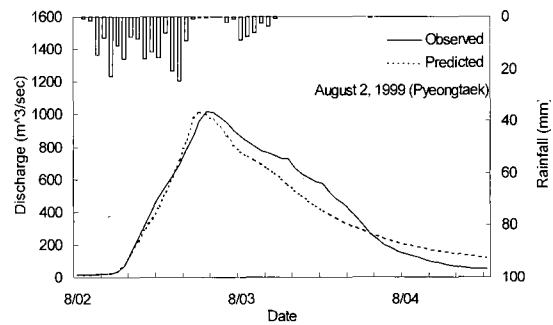
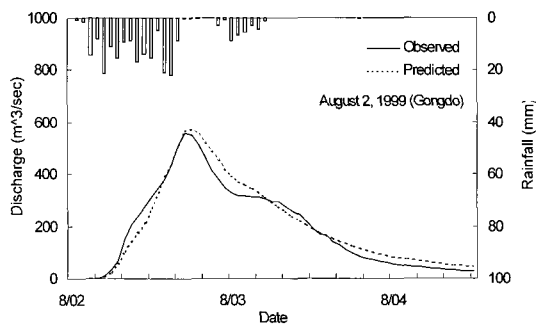
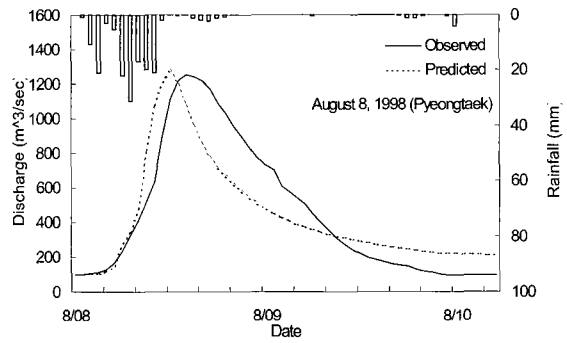
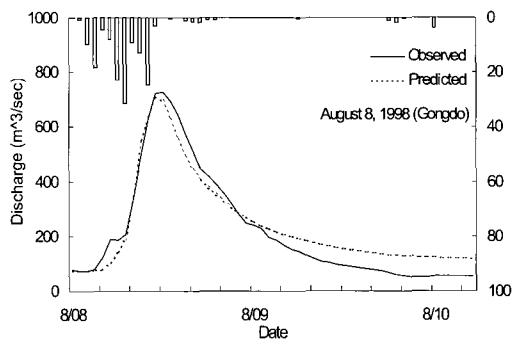
Table 6. Summary of water level observation station

Code	Obs. station	Stream name	Obs. type	Obs. station location			Beginning date	Area (km ²)
				Place name	Longitude	Latitude		
1101625	Gongdo	Anseong-cheon	T/M	Unggyo Gongdo-myeon Anseong-si Gyeonggi-do	127-11-08	36-58-18	1996. 9	379.2
1101645	Pyeongtaek	Anseong-cheon	T/M	Gunmungyo Gunmun-dong Pyeongtaek-si Gyeonggi-do	127-04-50	36-58-50	1929. 1	592.6

모형의 보정을 위한 매개변수는 하천과 토지피복(산림, 논, 밭, 주거지)별 Manning조도계수, 초기침투능, 침투매개변수(초기침투율 및 최종침투율)이다. 이상의 매개변수들을 대상으로 유출에 미치는 민감도 분석을 실시한 결과, 지표면에서의 Manning조도계수를 증가시키면 침투유량이 감소하고 침투시간은 느려지는 것을 확인할 수 있었고, 총유출량은 거의 변화가 없었다. 초기토양수분은 유효공극률의 포화도를 증가시키면 토양의 저류능이 상대적으로 감소하게 되므로 침투유량과 총유출량이 감소하였고, 침투시간에는 변화를 주지 않았다. 초기침투능과 최종침투능은 모두 유출에 민감하였는데, 초기침투능을 증가시키면 침투유량과 총유출량이 비례적으로 감소하였고, 최종침투능은 일정하게 감소하였으며, 둘 다 침투시간에는 변화를 주지 않았다. 매개변수의 민감도는 Manning조도계수, 초기침투능, 최종침투능, 초기토양수분 순으로 나타났다. 민감도 분석의 결과

를 토대로, 본 연구에서는 민감도가 큰 매개변수 3가지(Manning조도계수, 초기침투능, 최종침투능)를 대상으로 단순한 시행오차방법에 의하여 모형을 보정하였다.

5개 강우사상에 대한 공도 및 평택관측소의 실측유량자료와 모형에 의한 모의발생치를 비교하면 Fig. 5와 같으며, Table 7은 티센망에 의한 보정 매개변수와 주요결과를 정리한 것이다. 논외의 매개변수가 큰 범위를 가지고 보정되었는데, 이는 강우전 논외의 담수심에 따라 저류능의 변화가 큰 것을 반영해 주고 있다고 판단된다. Nash-Sutcliffe (1970) 모형효율은 공도 및 평택관측소를 대상으로 각각 평균 0.72 - 0.59의 값을 보였다. 그림에서 감수곡선 부분의 오차 원인은 집중형 모형의 고찰에서와 마찬가지로 유역면적의 22.5%를 차지하는 논외의 강우전 담수심에 따른 저류능력, 강우진행시 농민외의 물꼬를 통한 강제배수에 의한 지표유출이 큰 영향을 준 것으로 판단된다.



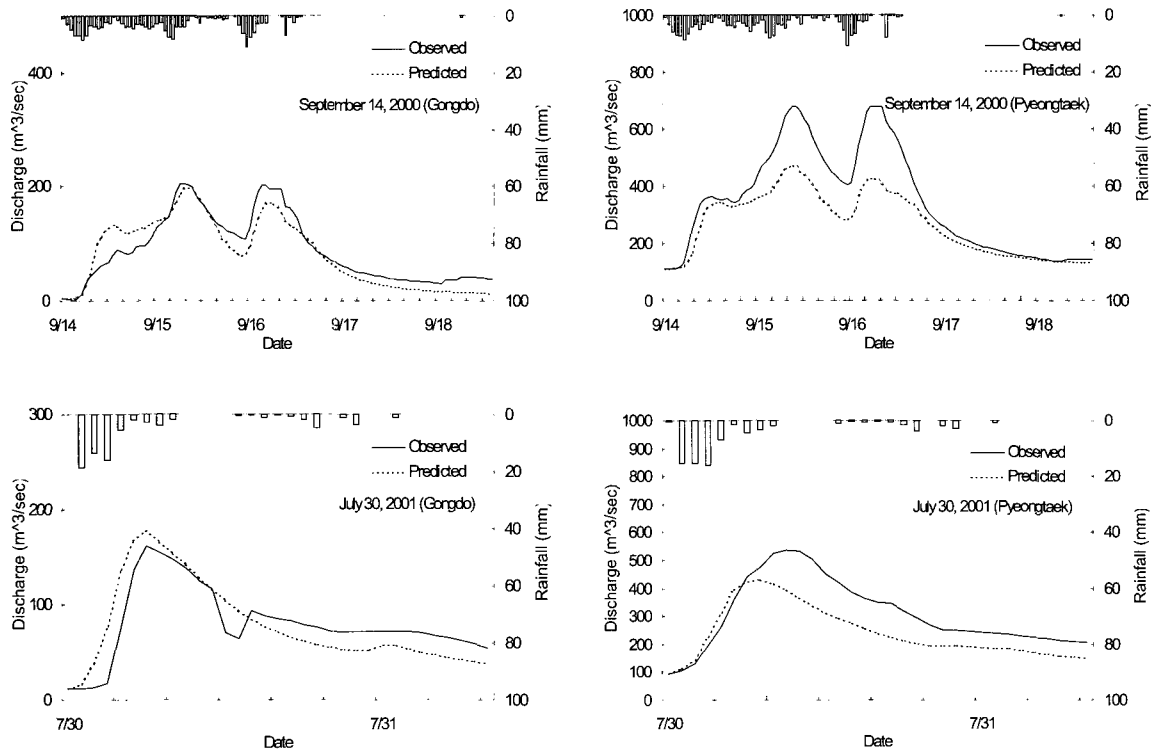


Fig. 5. Comparison of simulated result with observed data by KIMSTORM (Calibration)

Table 7. Summary of KIMSTORM model calibration and its parameters

Rainfall event	Rainfall (mm)		Manning roughness coefficient					Initial soil moisture	Infiltration parameters			Runoff volume (mm)		Peak runoff (m³/sec)		Nash-Sutcliffe eff.
			Forest	Paddy	Upland	Urban	Stream		fo	fc	b	obs.	sim.	obs.	sim.	
8/08/98	GD	158.7	0.8	8.0	0.4	0.4	0.055	0.90	4.0	0.3	0.65	116.2	127.5	728.0	710.9	0.93
	PT	168.6										151.4	144.5	1253.0	1276.8	0.76
8/02/99	GD	228.2	1.8	3.6	0.4	1.8	0.065	0.90	5.0	0.5	0.65	113.5	120.7	558.0	575.1	0.96
	PT	231.2										155.6	148.5	1018.0	1021.0	0.94
8/26/00	GD	244.9	0.4	2.8	0.4	0.8	0.055	0.97	4.5	1.0	0.65	136.6	140.9	511.0	533.2	0.94
	PT	268.0										342.9	292.0	1392.0	1261.7	0.72
9/14/00	GD	198.4	0.6	0.8	0.4	0.8	0.055	0.83	4.0	0.33	0.65	97.1	90.2	205.0	197.9	0.84
	PT	195.1										236.5	185.1	681.0	471.8	0.63
7/30/01	GD	78.5	1.05	0.05	0.4	0.4	0.055	0.60	9.0	2.9	0.65	25.9	25.6	162.0	177.4	0.64
	PT	78.2										538.0	431.6	62.5	49.3	0.51
Mean	GD	181.7	0.93	3.05	0.40	0.84	0.06	0.84	5.30	1.01	0.65	81.6	84.2	309.6	365.8	0.72
	PT	188.2										237.3	417.0	630.0	680.1	0.59

모형의 검증은 모형의 보정을 통하여 얻은 매개변수들의 평균값을 이용하여 2003년도의 2개 강우사상에 대하여 실시하였다. 그 결과는 Fig. 6 및 Table 8에 정리하였다. 향후 모형의 적용시에는 모형의 보정을 통한 평균 매개변수들을 사용하는 것이 원칙이나, 강우시마다 초기침투능과 초기토양수분은 변화가 있기 때문에 이 매개변수들의 강우사상별 보정은 불가피할 것으로 판단된다.

3.2 토지이용의 변화에 따른 하천유출량의 경년변화 분석

KIMSTORM 분포형 모형을 이용하여 2개년의 토지피복 변화에 대한 유출변화는 Fig. 7과 같으며, 그 결과를 정리하면 Table 9와 같다. 1986년을 기준으로 1999년의 침투유출량이 공도관측소 유역은 14.3%, 평택관측소 유역은 30.3% 증가하였다. 총유출량으로는 각각 3.8%, 9.3% 증가한 결과를 보였다. 분포형 모형이 토지이용의 공간적 분포를 고려하기 때문에, 토지이용의 공간적인 변화가 하천유출에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

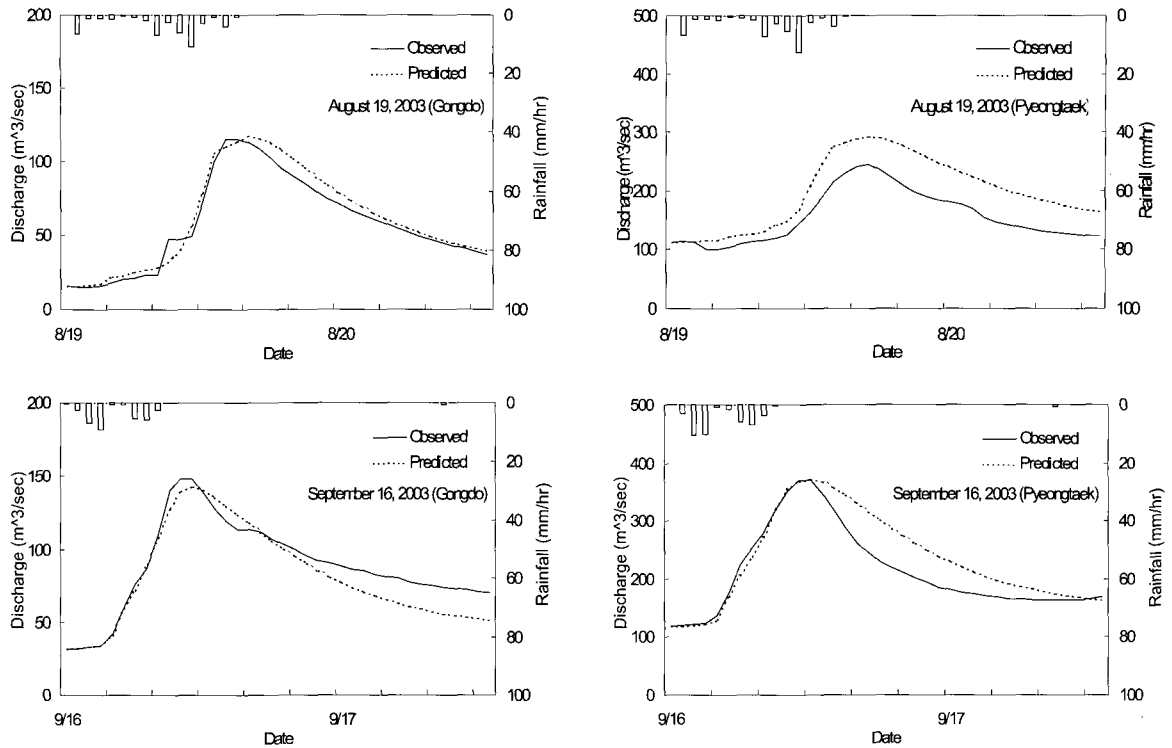
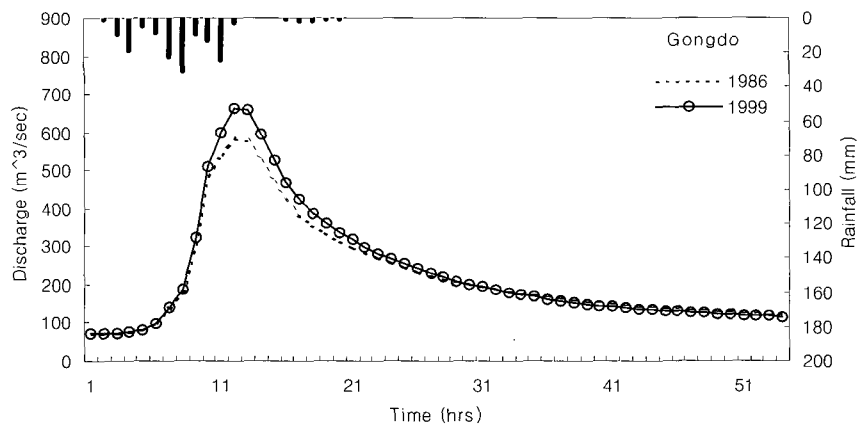


Fig. 6. Comparison of simulated result with observed data by KIMSTORM (verification)

Table 8. Summary of KIMSTORM model verification

Rainfall event	Rainfall (mm)		Manning roughness coefficient					Initial soil moisture	Infiltration parameters			Runoff volume (mm)		Peak runoff (m³/sec)		Nash-Sutcliffe eff.
			Forest	Paddy	Upland	Urban	Stream		fo	fc	b	obs.	sim.	obs.	sim.	
8/19/03	GD	48.5	0.93	3.05	0.40	0.84	0.06	0.84	5.30	1.01	0.65	21.5	22.9	115.0	117.3	0.96
	PT	49.2										28.1	36.0	223.0	285.4	-0.95
9/16/03	GD	34.9	0.93	3.05	0.40	0.84	0.06	0.84	5.30	1.01	0.65	32.9	30.4	148.0	142.6	0.87
	PT	42.7										49.6	55.0	370.0	368.7	0.74



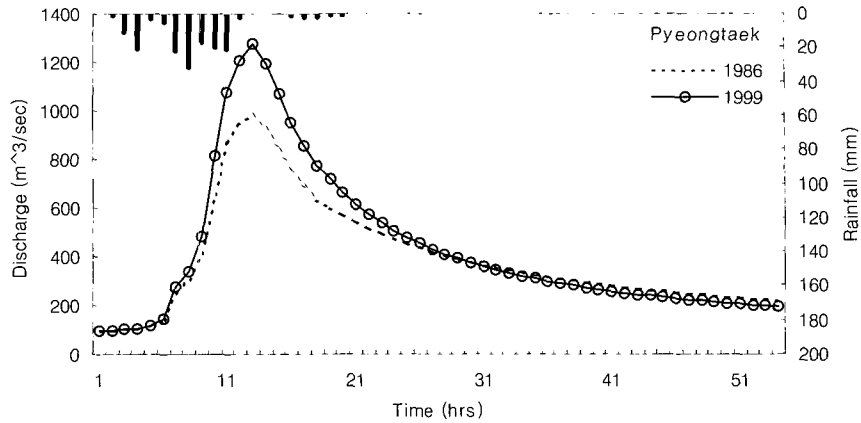


Fig. 7. Comparison of runoff by applying land cover data for Gongdo and Pyeongtaek

Table 9. Summary of runoff by applying land cover data for 2 selected years

Year	Watershed (station)	Rainfall (mm)	Peak runoff (m³/s)	Total runoff (mm)
1986	WS1(Gongdo)	151.4	579.6	119.5
	Total(Pyeongtaek)	160.5	980.0	131.7
1999	WS1(Gongdo)	151.4	662.6	124.1
	Total(Pyeongtaek)	160.5	1276.8	144.0

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 과거 꾸준히 농지면적의 변화가 진전된 안성천 평택수위관측소 상류유역을 대상으로 과거 13년 간의 토지피복 분석결과와 구축된 GIS 자료(수치고도모델, 하천도, 토양도 등)를 기반으로, GIS 기반의 수문모형을 이용하여 GRID 해석에 따른 농지이용의 변화가 하천유출 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구를 정리하면 다음과 같다.

1. 대상유역의 토지이용 변화를 파악하기 위한 RS 자료는 1986년 4월 15일과 1999년 4월 19일에 관측된 Landsat TM 영상을 이용하였으며, 전처리 과정과 피복분류 과정을 통하여 토지피복 변화를 분석하였다. 분류 결과는 error matrix 작성과 지적통계와의 비교를 통해서 확인하였으며, 도시 및 주거지면적이 1986년 3.3%에서 1999년에 9.3%로 6.0% 증가하였고, 산림과 논은 1986년에 46.3%, 26.5%에서 1999년에는 41.5%, 22.5%로 각각 4.8%, 4.0%가 감소하였다.
2. 토지이용의 변화가 하천유출 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 수문모형으로는 분포형 모형

KIMSTORM을 선정하였다. 산림, 논, 밭, 주거지, 하천의 각 Manning 조도계수, 침투매개변수, 초기 토양수분을 보정한 결과, Nash-Sutcliffe 모형효율은 공도 및 평택관측소를 대상으로 각각 평균 0.72 - 0.59의 값을 보였다.

3. 13년(1986년-1999년)동안 유역내 산림면적이 4.8%, 논면적이 4.0%가 줄어든 반면, 도시 및 주거지면적은 6.0% 증가한 상태에서, 160.5mm의 강우조건으로 평택수위관측소 지점의 침투유출량은 30.3%, 총유출량은 9.3% 증가한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2003년도 IHP사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김성준 (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발 (I)-이론 및 모형-", 한국수자원학회논문집, 제31권, 제3호, pp. 303-308.
- 김성준, 채효석, 신사철 (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II)-적용예-", 한국수자원학회논문

- 문집, 제31권, 제3호, pp. 309-315.
- 안성시 (1987, 2000). **안성시 통계연보**.
- Beven, K. J. (1982). "On subsurface stormflow: Predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1627-1633.
- Moore, I. D. and Burch, G. J. (1986). "Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory." *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 8, pp. 1350-1360.
- Moore, I. D. and Foster, G. R. (1990). "Hydraulics and overland flow." In *Process Studies in Hillslope Hydrology*, Anderson, M. G. and Burt, T. P., eds. New York, N.Y.: John Wiley, pp. 215-254.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 283-290.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. and Saxton, K. E. (1982). "Estimation of soil water properties." *Trans. of ASAE*, Vol. 25, pp. 1316-1320, 1328.
- Sloan, P. G. and Moore, I. D. (1984). "Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 20, pp. 1815-1822.
- (논문번호:04-67/접수:2004.07.12/심사완료:2005.03.30)