

지리정보시스템을 이용한 소하천유역의 홍수유출 해석

이연길^{1*} · 박성천² · 이관수¹

Flood Runoff Analysis of Small River Basin using Geographic Information System

Yeon-Kil LEE^{1*} · Sung-Chun PARK² · Kwan-Soo LEE¹

요 약

효율적인 수자원의 계획과 관리를 위해서 필요한 유출량 산정에 적용되어지는 많은 강우-유출 모형들은 유역의 특성을 나타내는 지형인자와 매개변수 등과 같은 입력자료가 필요하게 되어 실제 적용단계에 있어 많은 어려움을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 보완하고자 지리정보시스템(GIS)을 적용하여 입력자료를 생성할 수 있는 환경과 GIS와 강우-유출모형과의 연계를 통하여 시간에 따른 유출량의 변화를 나타내는 수문곡선을 해석할 수 있는 환경을 구축하고자 하였다. 입력자료 구축을 위한 GIS 소프트웨어로는 ArcView를 이용하였으며, 대상유역의 수문곡선을 해석하기 위해서 $\ln(a/T_o \tan \beta)$ 이라는 지형지수를 적용하는 TOPMODEL를 이용하였다. 또한, 대상유역의 유출량 산정에 이용한 강우-유출모형의 적용성을 평가하기 위하여 과거의 강우자료 중에서 단순호우사상과 복합호우사상을 선별하여 모형에 적용하였다.

주요어: 수자원계획, 유출량, 지형지수, 수문곡선, TOPMODEL

ABSTRACT

Many rainfall-runoff model, which is applied discharge calculation for effective water-resource planning and management needs topographic and parameter of basin character. But it is very difficult to apply real a phase. Accordingly in this study filling up these problems. Applying GIS(geographic information system) through environment creating input data or concerning with GIS and rainfall runoff model. We built environment that analyze hydrograph showing discharge variation by time. GIS software for constructing input data is used by ArcView. For analysis of hydrograph in Basin, TOPMODEL applied topographic index. Besides for estimate of appliance to rainfall-runoff model, simple storm event and complex storm event are applied rainfall data which was before.

KEYWORDS: Topographic index, Hydrograph, TOPMODEL, Rainfall-Runoff Model

2003년 2월 5일 접수 Received on February 5, 2003 / 2003년 3월 20일 심사완료 Accepted on March 20, 2003

¹ 전남대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Chonnam National University

² 동신대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Dongshin University

* 연락처 E-mail: yeonkil@mail.kwangju.ac.kr

서 론

1980년대에 처음으로 우리 나라에 도입된 GIS는 컴퓨터의 발달과 정보화 사회의 과정 속에서 그 효용가치를 인정받아 여러 분야의 활용방안이 강구되고 있으며, 특히, 수문분야에서는 DEM(digital elevation model)을 이용한 Grid 분석에 의한 유출해석방법이 활발히 행하여지고 있다. 본 연구에서는 전라남도 담양군에 위치한 오례천 유역을 대상유역으로 하여 격자형 DEM을 기반으로 한 TOPMODEL(TOPography based hydrological MODEL)를 이용하여 효율적인 수자원계획의 수립을 위한 강우-유출해석을 실시하였다. 유역내 물의 거동을 물리적 현상에 근거를 두고 유출기여면적에 따른 분포모형으로서 유역의 지형에 의한 토양 내에서의 물의 이동 등을 모의할 수 있는 TOPMODEL은 1970년에 Beven과 Kirkby에 의해 제안되어 우리나라에서도 많은 연구가 진행되고 있는 모형이라 할 수 있다. 김동희(2000)는 GIS를 이용한 소유역의 유출특성 분석에서 TOPMODEL과 HEC-HMS와의 비교를 통하여 TOPMODEL의 유역응답의 우수한 재현성을 보여준 바 있다. 본 연구의 목적은 수자원의 효율적인 관리와 계획을 위해서 강우-유출모형과 지리정보시스템과의 연계를 통한 유출해석을 실시하기 위한 GUI를 구축하는데 있다. GUI를 구축하기 위한 과정으로 GIS의 소프트웨어인 ArcInfo와 ArcView를 이용하여 강우-유출모형에 사용될 DEM을 생성하였고, GIS 소프트웨어와 TOPMODEL과의 연계를 통한 GIS의 수문분야의 적용성을 검토하였다. 또한 GIS 소프트웨어인 ArcView의 윈도우 환경 아래에서 손쉽게 TOPMODEL을 적용할 수 있는 GUI를 구축하고자 하였다. TOPMODEL의 지형자료를 추출하기 위해서 GIS의 그리드 분석기법을 효율적으로 이용하였고, 단순호우사상 및 복합호우사상에 대하여 각각의 실측값과 모의값에 대하여 비교·분석하였다.

연구 이론의 배경

1. 지리정보시스템

우리가 살아가는 지표공간에 나타나는 지리정보를 수치정보화하여 컴퓨터에 저장하여 활용하는 기술인 지리정보시스템(GIS)은 산업화, 도시화로 지상, 지표, 지하의 모든 현실세계에서 복잡하게 일어나는 지리현상을 체계적으로 이해하고 관리하기 위하여 1960년대에 개발되기 시작하였으며, 1980~1990년대의 GIS는 공간정보의 수집 및 각종 소프트웨어의 연구들이 활발히 이루어져 향후 다가올 정보화 사회의 근간을 만들었으며, 1990년대 이후에는 정보화시대와 발맞추어 일상생활에 유용하게 활용되고 있다

1) 수치고도모델 생성

본 연구의 대상유역인 오례천 유역의 DEM을 생성하기 위해서 1:5,000의 수치등고선도를 기본도로 하여 ArcInfo에서 커버리지를 생성하였다. ArcView에서 각각의 Shape파일로 변환한 후 도면접합과정을 거쳐 하나의 수치등고선도로 생성하였다. ArcView파일로 변환된 하나의 수치등고선도로부터 불규칙 삼각망이라 불리는 TIN을 생성하여 최종적인 DEM을 생성하였다. 생성된 DEM으로부터 오례천 유역의 유역경계도를 산출하기 위해서 본 연구에서는 Hillclimbing 알고리즘의 이론을 바탕으로 유역경계도를 생성할 수가 있었다. Hillclimbing 알고리즘이란 DEM을 입력자료로 지정된 유출구의 표고를 기초로 한 인접셀의 표고와 비교를 통하여 분수계를 찾는 알고리즘으로서 어떤 특정지점에서 그 지점을 유출구로 하여 대상유역을 발취하는 알고리즘이라 할 수 있다.

2) 8방향 유출모형과 흐름방향격자 생성

본 연구에서는 경사도에 의한 흐름방향을 추적하기 위해서 물은 하류부로 흐른다는 기본적인 전제 하에 인접한 셀들 사이에서의 흐

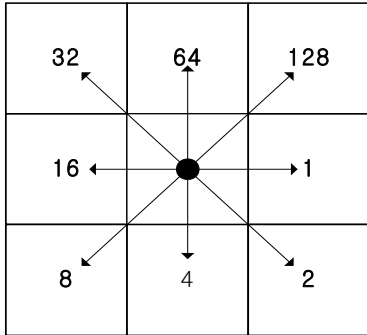


FIGURE 1. 8-direction pour point model

67	56	49	46	50
53	44	37	38	48
58	55	22	31	24
61	47	21	16	19
53	34	12	11	12

FIGURE 2. Elevation grid

2	2	4	4	8
1	2	4	8	4
128	1	2	4	8
2	1	4	4	4
1	1	1	2	16

FIGURE 3. Flow direction grid

421	25	22	31	30	26
30	422	14	6	7	239
36	37	423	20	240	4
40	41	38	424	12	16
42	43	44	425	24	36
48	50	52	426	40	51

FIGURE 4. Flow accumulation grid

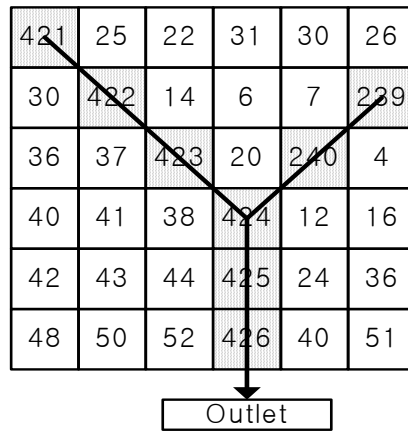


FIGURE 5. Channel construction using flow accumulation grid

름의 방향은 경사가 큰 경로를 따른다는 8방향 유출모형을 이용하였다. 그림 1에서와 같이 하나의 셀에 인접한 8개 경로 중에서 하나의 경로를 따라서 물은 흐를 수 있다. 각 셀내의 숫자는 가장 가까운 하류부 셀로 유입되기 위한 물의 이동방향을 나타내고 번호를 부여하는 체계는 약정에 의한 것이다.

3) 흐름누적 격자와 하도 생성

표고격자를 기반으로 한 흐름방향 격자라고 하는 이 새로운 격자는 8방향 유출모형에 의해 정해진 방향 값만을 가지는 셀로 구성되며 그림 2와 그림 3은 표고격자와 흐름방향 격자를 나타낸다. 또한 그림 4에서와 같이 흐

름 누적 격자란 계산된 흐름방향 격자로부터 구할 수가 있는데 이 격자는 개별적인 셀로 배수되는 셀의 수를 기록한다. 흐름방향 격자를 누적하여 나타낸 흐름방향 격자로부터 그림 5와 같이 다음 셀에 흘러드는 상위의 누적 셀 수를 계산하여 누적된 셀수가 특정값에 이르면 하도(channel)로 표현되게 하여 하도를 생성하였다.

4) Hillclimbing 알고리즘에 의한 대상유역 생성

Hillclimbing 알고리즘이란 특정지점에서 그 지점을 유출구로 하여 대상유역을 발체하는 알고리즘이라 할 수 있으며, 그림 6에서와 같

24	23	22	21	20	19	18	15	16	17	50	46	50	51	19	20	21	22
7	8	9	11	12	13	14	30	28	40	45	54	58	50	63	18	23	24
30	10	17	18	20	22	28	38	42	46	58	51	44	62	60	65	25	26
10	13	18	22	26	30	34	27	36	39	44	47	46	61	66	55	52	27
11	14	12	16	21	8	29	25	26	27	28	29	30	54	53	70	70	28
15	10	13	14	21	22	23	40	24	39	38	37	31	32	33	68	74	66
12	11	100	15	20	41	42	43	44	45	46	47	36	35	34	70	78	65
55	130	138	120	16	117	18	19	48	49	50	51	52	53	54	74	82	73
56	57	12	134	115	116	112	111	101	107	95	92	93	88	81	80	40	40
58	59	126	114	130	120	122	118	114	116	100	102	98	94	90	81	11	13
60	61	62	63	113	117	118	110	105	94	96	97	86	90	87	17	16	14
64	65	66	67	68	69	70	50	52	426	40	51	48	50	52	426	40	51

FIGURE 6. Study area using hillclimbing algorithm

이 인접한 4개의 표고 값 중에서 가장 높은 값이 분수계를 이룬다. 또한, 분수계를 이루는 셀이 대상유역에 포함되기 때문에 Grid의 셀 크기에 따라서 때로는 대상유역의 면적이 과도하게 표현되기도 하고 또는 과소하게 표현이 되기도 한다.

2. TOPMODEL의 이론

TOPMODEL은 전통적인 수문모형과는 다른 유역내 물의 거동을 물리적 현상에 근거를 둔 유출기여면적에 따른 분포모형으로서 기본식은 연속방정식과 Darcy 법칙(Darcy's law)이며 다음과 같은 4가지 가정에 기초한다. 첫째, 유역 내에서 지하수의 거동형태는 모의단위격자의 지형적인 특성을 통해 나타내어진 지형지수에 따라 좌우되고, 같은 지형지수를 가진 지역은 수문학적으로 같은 거동형태를 갖는다. 둘째, 유역 내 포화층의 동수경사는 지표면 경사인 $\tan \beta$ (β :사면의경사)로 표현될 수 있다. 셋째는 투수량계수(transmissivity)는 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수 함수적으로 감소한다는 것이고, 넷째, 포화지역으로의 유입률은 일정하

다는 것이다. Hursh와 Brater(1941)는 수로상강수와 하천과 가까운 얇은 지하수위를 가진 지역이 하천유량 생성에 영향을 미치고, 토양을 통해 이동하는 강수는 하천에 대하여 지표하 흐름이 될 수 있으며, 이것은 유출수문곡선에 기여하게 된다는 변화수원면적(variable-source-area) 개념에 따라 아래의 세 가지 흐름으로서 유출되는 유량을 기술하였다. 첫째, 포화지역에 떨어지는 경우는 직접 하천유량에 기여한다. 둘째, 지하수위가 상승하면, 지표하 흐름은 지표면으로 돌아가게 되며 하천으로 흐르게 되며 이를 환원수(return flow)로 정의하였다. 셋째, 하천유량은 토양구조를 통해 하천으로 유하하며 지표하 흐름으로 정의한다. 위 개념에 기초하여 하천으로 유출되는 유량은 다음과 같은 식(1)로 기술된다.

$$Q_t = q_d + q_r + q_s \quad (1)$$

여기서, Q_t = 단위면적당 총 유량

q_d = 포화지역에서의 직접강우에 의한 유량

q_r = 하천으로 복귀되는 유량

q_s = 단위면적당 지표하 유량

본 연구에서는 TOPMODEL에 대한 기본방정식에 대한 설명을 간단히 요약한다. 예를 들어 임의의 i 지점은 일정한 지하수위를 가지고 공간적으로 균일한 강우강도를 갖는 정상상태 (steady state)라 가정하면 하향경사 유량 Q_i 는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$Q_i = A_i R = T_i \tan \beta_i C_i \quad (2)$$

Beven은 포화투수계수 $K(z)$ 가 토양의 깊이 에 따라 지수적으로 감소한다는 것을 보여주는 자료를 제시하였으며 식 (3)과 같다.

$$K(z) = K_o e^{-fz} \quad (3)$$

포화지역의 토양 투수량계수 (T_i)는 식 (3)을 어떤 지점 i 에서의 지하수면의 깊이 (z_w)에서부터 총 토양깊이 (z_d)까지 적분함으로써 구할 수 있으며 식 (4)와 같다.

$$T_i = \int_{z_w}^{z_d} K_o e^{-fz} dz \\ = \frac{K_o}{f} [e^{-fz_w} - e^{-fz_d}] \quad (4)$$

여기서, z 에 비해서 z_d 는 매우 커서 투수량계수에 영향을 미치지 못하므로 식 (4)는 식 (5)로 다시 표현될 수 있다.

$$T_i = \frac{K_o}{f} [e^{-fz_w}] \quad (5)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하여 i 지점의 지하수면의 깊이 z_i 에 대하여 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln R - \frac{1}{f} \left[-\frac{a}{T_o} \tan \beta \right]_i \quad (6)$$

이때 $a_i = A_i/C$, $T_o = K_o/f$ 이고 f 는

깊이에 따른 수리전도도의 변화율이다. 식 (6)을 유역전체에 대해서 적분하면 유역평균 지하수면의 깊이 \bar{z} 을 아래 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{z} = -\frac{1}{f} \ln R - \frac{1}{f} \lambda \quad (7)$$

여기서 $\lambda = \ln(a/T_o \tan \beta)$ 의 평균값

식 (6)과 식 (7)을 이용하여 \bar{z} 의 함수로 나타내면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f} [\lambda - \ln(\frac{a}{\tan \beta})_i] \\ + \frac{1}{f} [\ln T_o - \ln T_e] \quad (8)$$

여기서 $\ln T_e = \ln T_o$ 의 유역 내 공간 평균값

식 (8)에서 토양특성이 균질한 유역 내에서 T_o 는 공간적으로 일정하다고 가정하면 식 (8)의 마지막 항이 소거되어져 TOPMODEL의 기본방정식 식 (9)을 만들 수 있다.

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f} [\lambda - \ln(\frac{a}{\tan \beta})_i] \quad (9)$$

지리정보시스템 구축 및 자료생성

본 연구에서는 강우-유출모형인 TOPMODEL과 GIS의 연계를 통한 강우-유출해석을 효율적으로 실시하기 위해서 지리정보시스템의 환경을 다음과 같이 구축하였다. 입력자료의 생성을 위한 환경구축은 기존의 GIS의 인터페이스를 이용하였으며, TOPMODEL과의 연계를 위한 인터페이스는 Avenue 프로그램을 이용하여 직접 생성하였다. 대상유역의 지형학적인 특징을 나타내는 지형지수를 산정하기 위한 지리정보시스템 구축과정은 다음과 같다. 수치

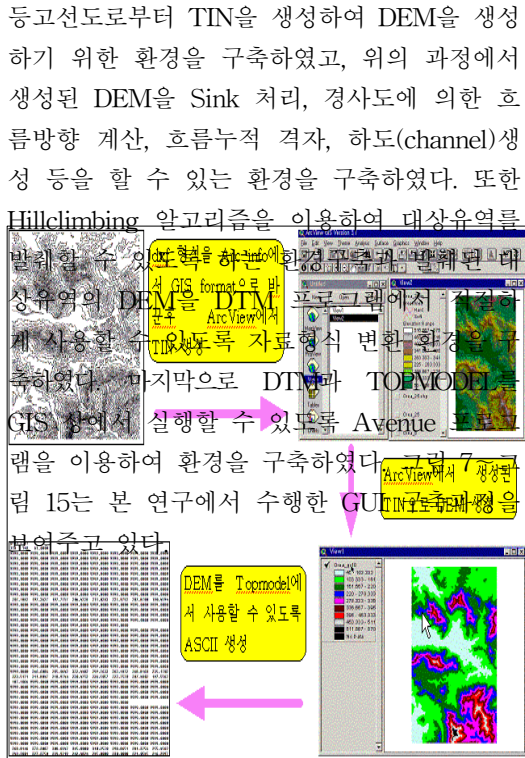


FIGURE 7. Process of DEM construction

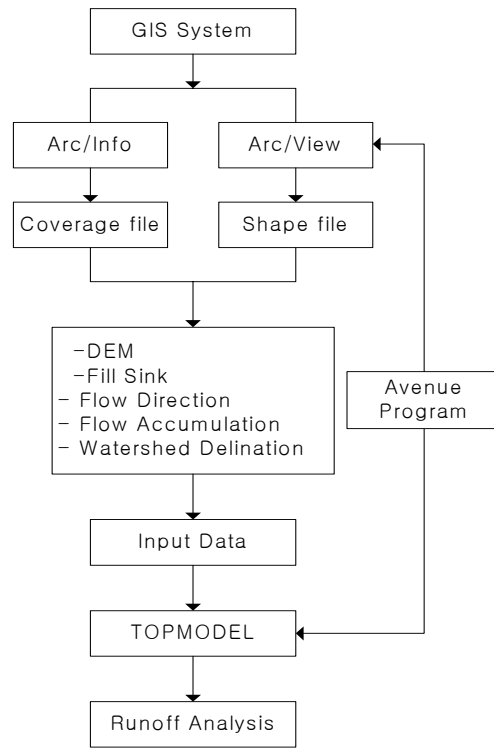


FIGURE 8. Flowchart of study

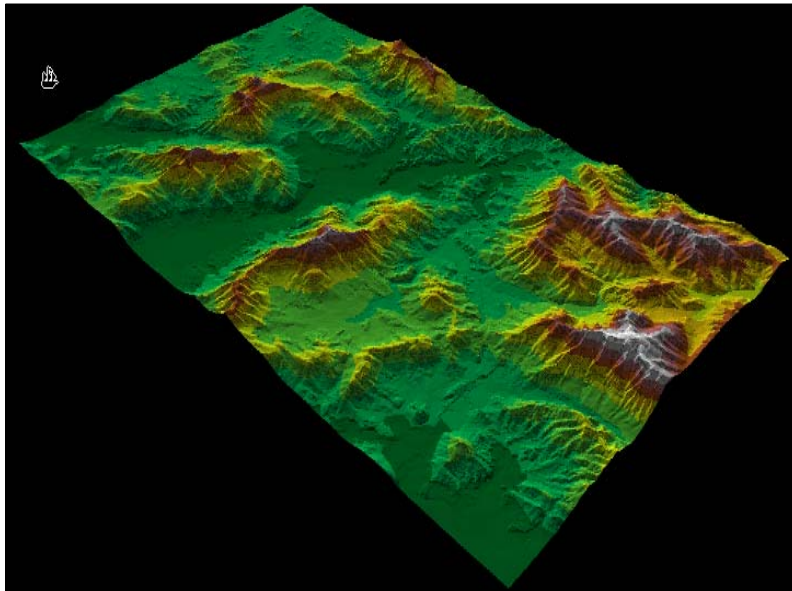


FIGURE 9. TIN imagery of 3-dimension in the study area

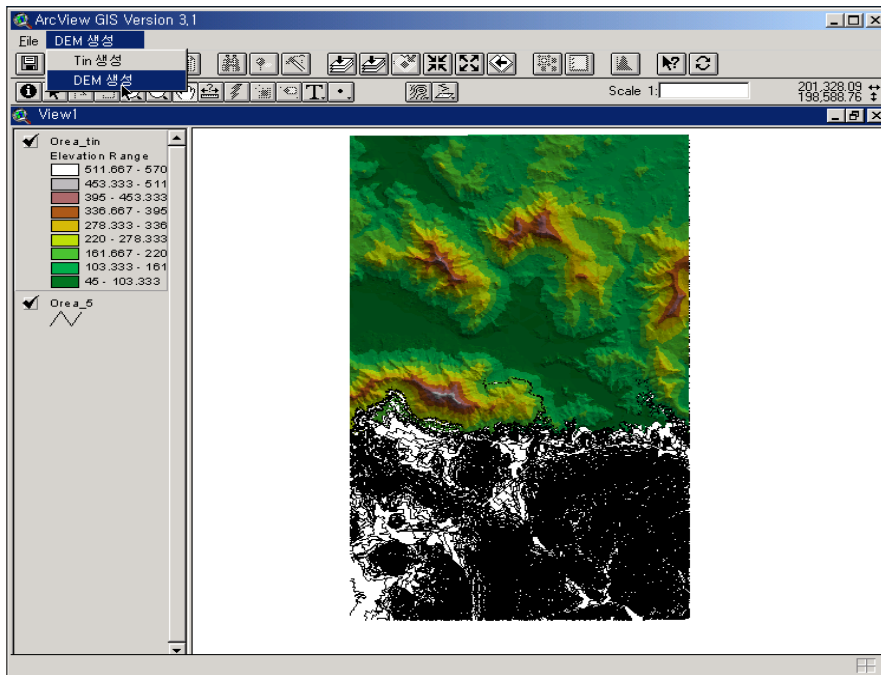


FIGURE 10. GUI construction for creation of TIN and DEM

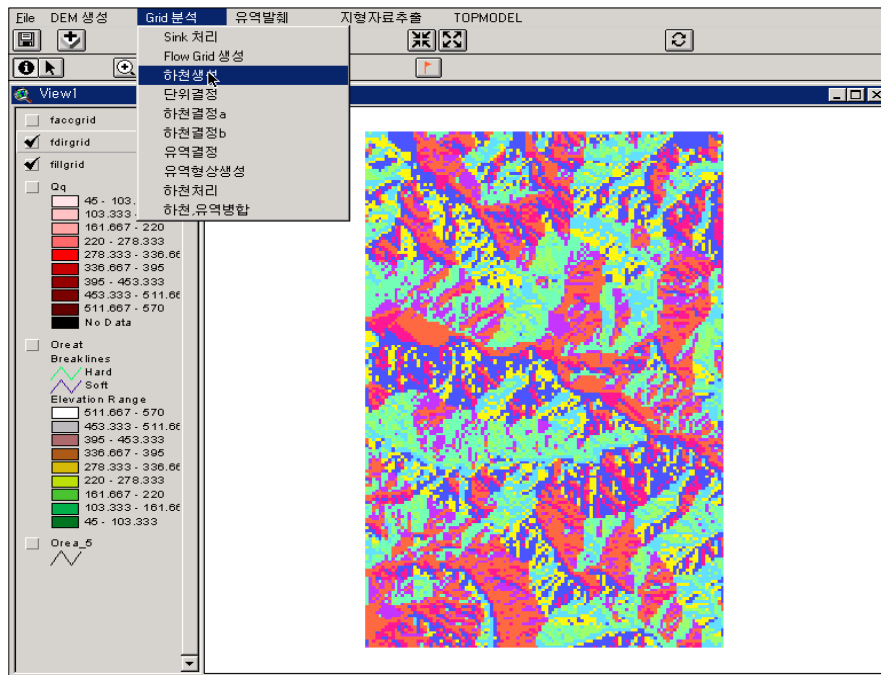


FIGURE 11. GUI construction for grid analysis

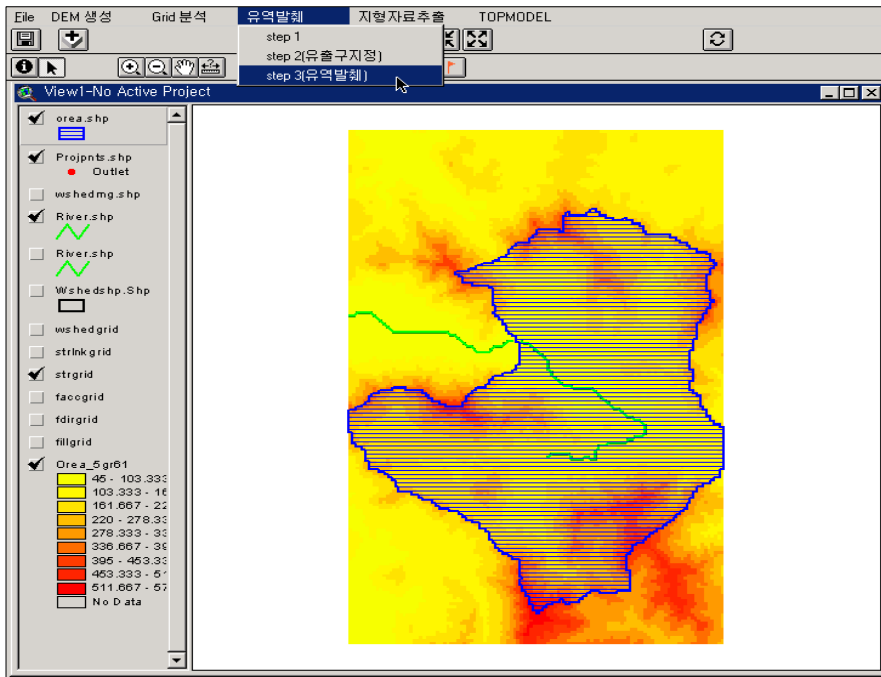


FIGURE 12. GUI construction for selection to the study area

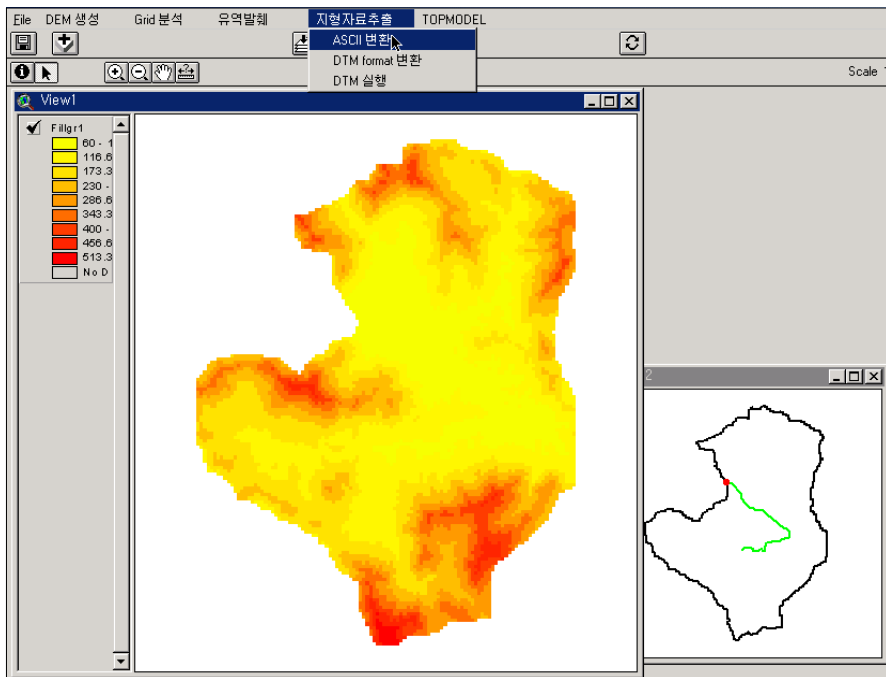


FIGURE 13. GUI construction for converting DEM format to DTM format

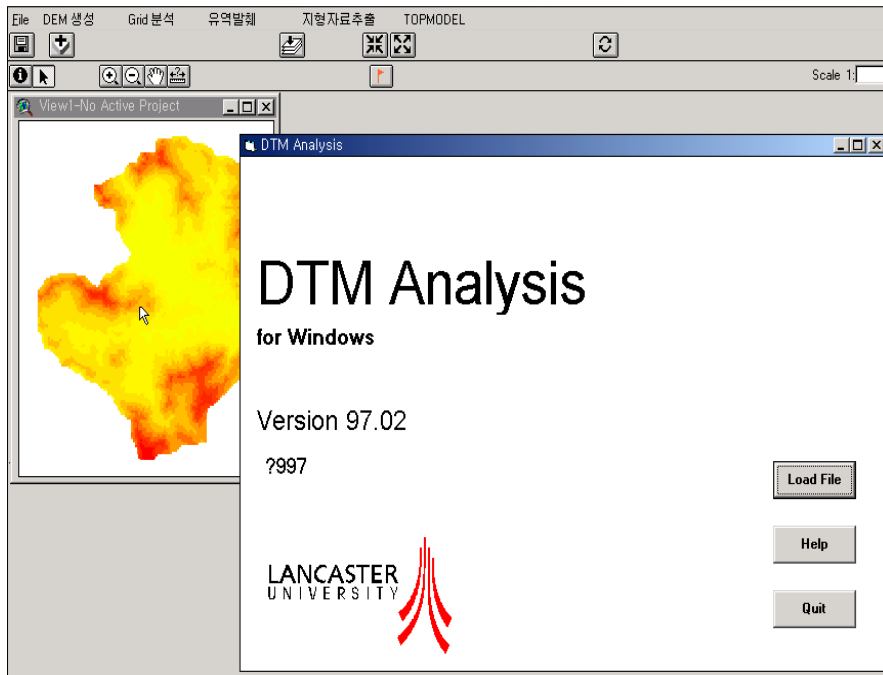


FIGURE 14. GUI Construction of DTM

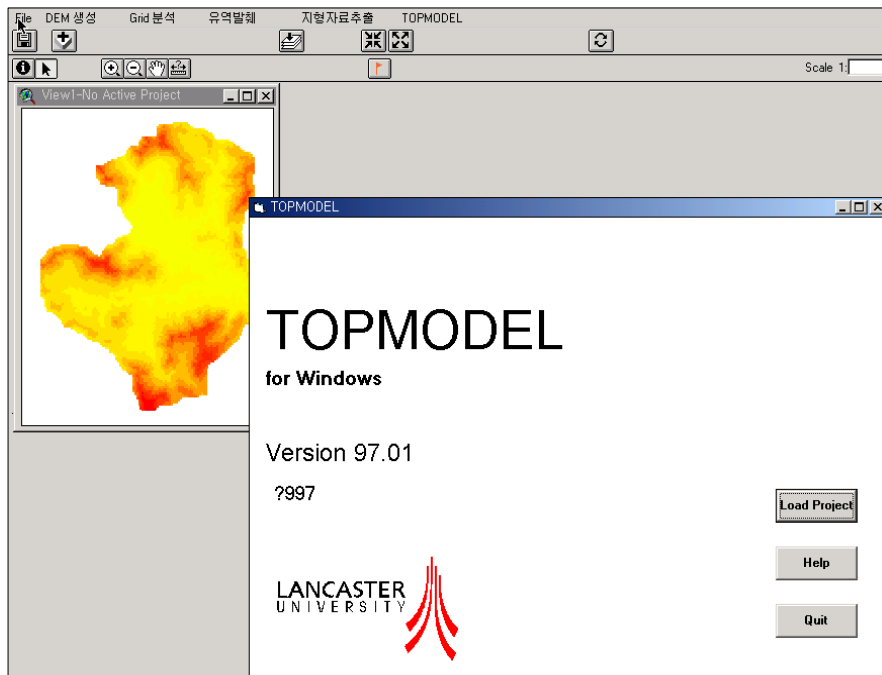


FIGURE 15. GUI construction of TOPMODEL

대상유역 현황 및 적용자료

본 연구의 대상유역은 영산강 수계의 상류 부인 전남 담양군 식정면에 위치한 덕룡교를 출구로 하는 유역면적 40.01km², 유역평균경사 8.82°, 형상계수 0.31의 소하천인 오례천 유역이다. 오례천 유역은 영산강 상류로서 수질상태가 매우 양호하고 유역면적의 대부분이 산지이므로 유역응답이 매우 빠른 편에 속하는 소유역이다. 유역형상은 그림 12에서 보듯이 둥그런 형상을 가지고 있다. 본 연구에 사용된 실측 유출량 자료는 한국수자원공사가 제시한 수위-유량관계 곡선식을 이용하였으며, 강우자료는 신뢰성이 있다고 판단되는 기상청의 시간별 강우자료를 이용하였다. 모의에 사용되어진 강우사상은 1998년 7월과 8월, 2000년 8월, 2001년 6월의 장마철의 호우사상을 이용하였으며, 이 중에서 1998년 7월, 2000년 8월, 2001년 6월의 호우사상은 복합호우사상이고, 1998년 8월은 단순호우사상을 나타낸다.

분석 결과 및 고찰

본 연구의 대상유역인 오례천 유역에 TOPMODEL의 적용성과 수자원분야에 지리정보시스템의 적용 가능성을 검토하기 위하여 1998년, 2000년, 2001년에 발생한 단순 및 복합호우사상을 선별하여 적용하였다. 오례천 유역에 대한 대표성을 갖는 TOPMODEL의 매개변수인 투수율 감소상수(m), 지표면에서의 투수계수(T_0), 최대저류량(SRmax)과 초기저류량(SRinit) 등의 초기범위를 산정하기 위해서 1998년 8월의 호우사상을 적용하였다. 2000년 8월과 2001년 6월의 호우사상을 이용하여 초기범위에 대한 검증을 실시하였다. 또한 오례천유역을 대표하는 최적의 매개변수를 결정하기 위해서 각각의 호우사상을 적용하여 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 최적화는 TOPMODEL에서 제공하는 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 이용하였고 1,000회 반복 수행한 결과를 표 1에 나타내었다.

TABLE 1. Establishment of TOPMODEL parameter to storm event

Time	Type	m (m)	$\ln(T_0)$ ($\ln(m^2/h)$)	SRmax (m)	SRinit (m)
1998.7.30 ~1998.8.5	Case III	0.019	6.37	0.098	0.001
1998.8.12~1998.8.15	Case I	0.012	3.10	0.079	0.064
1998.8.17~1998.8.20	Case II	0.016	9.50	0.033	0.018
2000.8.24~2000.8.30	Case IV	0.014	2.66	0.036	0.019
2001.6.22~2001.6.28	Case V	0.021	7.50	0.050	0.000
Initial Range		0.01~0.02	2~9.9	0~0.09	0~0.07

TABLE 2. Result of Analysis to the Simple Storm Event

Storm event	Peak flow		Error of peak flow (mm)	R^2
	Observed(mm)	Simulated(mm)		
Case I	7.546	7.253	0.292	0.817
Case II	6.527	6.443	0.083	0.977

1. 단순호우사상에 대한 분석

1998년 8월 12일~15일(Case I), 1998년 8월 17일~20일(Case II)의 단순호우사상에 대하여 모의 및 분석 결과는 표 2와 그림 16~17에 나타내었다.

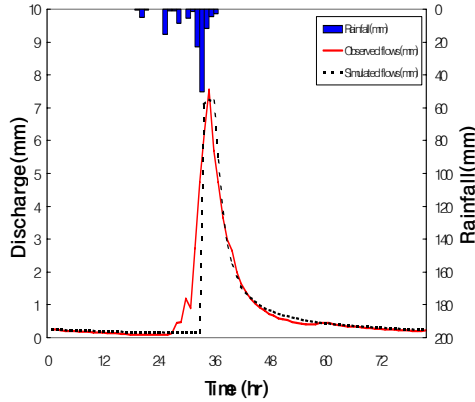


FIGURE 16. Hydrograph(1998. 8. 12~15)

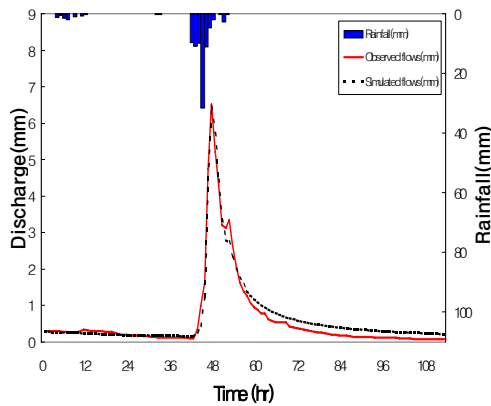


FIGURE 17. Hydrograph(1998. 8. 17~20)

2. 복합호우사상에 대한 분석

1998년 7월 30일~8월 5일(Case III), 2000년 8월 24일~30일(Case IV), 2001년 6월 22일~28일(Case V)의 복합호우사상에 대하여 모의 및 분석 결과는 표 3과 그림 18~20에 나타내었다.

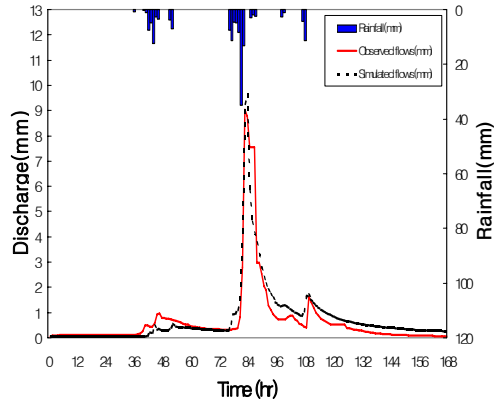


FIGURE 18. Hydrograph(1998. 7. 30~8. 5)

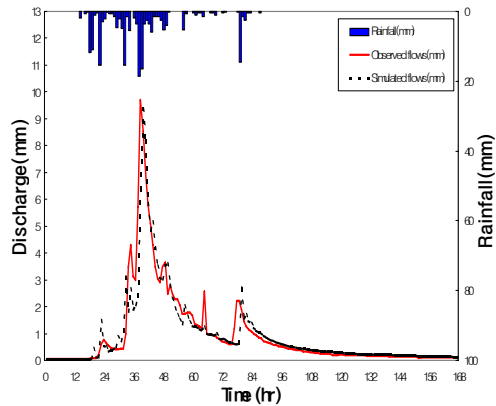


FIGURE 19. Hydrograph(2000. 8. 24~30)

TABLE 3. Result of analysis to the complex storm event

Storm event	Peak flow		Error of peak flow (mm)	R^2
	Observed(mm)	Simulated(mm)		
Case III	9.039	9.658	0.618	0.878
Case IV	9.907	9.365	0.342	0.865
Case V	4.829	4.809	0.020	0.951

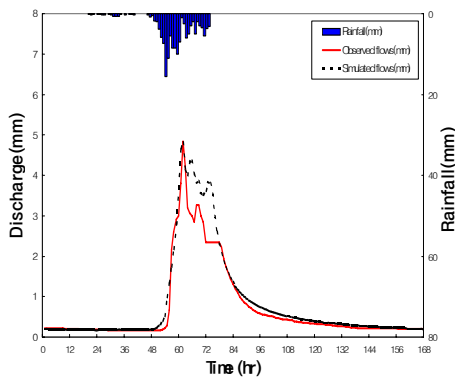


FIGURE 20. Hydrograph(2001. 6. 22~28)

지리정보시스템의 적용성과 TOPMODEL의 오래전 유역에 대한 적용성을 파악하기 위한 방법으로 수문곡선과 산포도를 이용하는 도식적인 방법과 통계량인 결정계수를 이용하는 수치적인 방법을 이용하였다. 단순 호우사상에 대한 결정계수는 0.817~0.977의 범위를 나타내었고, 또한 복합 호우사상에 대한 결정계수도 0.865~0.951의 범위를 나타내어 TOPMODEL의 오래전 유역에 대한 적용 가능성을 제시하였다.

결 론

본 연구에서는 수자원의 효율적인 관리와 계획을 위해 지리정보시스템과의 연계를 통한 강우-유출해석을 실시하기 위해서 ArcView의 윈도우 환경 아래에서 손쉽게 TOPMODEL을 적용할 수 있는 GUI를 구축하였다. 또한 구축된 시스템으로 대상유역인 오래전 유역에 대하여 단순호우사상과 복합호우사상에 대하여 강우-유출해석을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수가 있었다.

첫째, GIS와 TOPMODEL과의 연계를 통한 GUI 구축으로 강우-유출해석을 하는데 필요한 지형인자를 용이하게 산출할 수 있었으며, 시간에 따른 유출량의 변화를 나타내는 수문곡선의 모의를 효율적으로 수행할 수 있었다.

둘째, 단순호우사상 및 복합호우사상에 대하여 각각의 실측값과 모의값을 비교·분석한 결과 결정계수가 사상별로 0.817~0.977, 0.865~0.951의 비교적 높은 범위를 나타내어 대상유역에 대한 TOPMODEL의 적용성을 제시하였다.

셋째, 대상유역에 대한 많은 강우자료와 수위자료를 구축하여 최적화를 수행한다면 보다 신뢰성있는 모형의 검증을 할 수 있을 것으로 사료된다. **KAGIS**

참고문헌

- 김동희. 2000. GIS를 이용한 소유역의 유출특성 분석. 경북대학교 석사학위논문. 100쪽.
- 김채승, 윤창신. 1999. 지리정보체계. 대영사. 654쪽.
- 박성천, 이연길. 2001. 도시유역의 유출기구변화에 따른 수문곡선 해석. 동신대공업기술연구. 7(1):59-71.
- 이관수, 박성천, 이연길. 1998. GIS의 적용에 의한 도시배수구역의 수문학적 평가. 한국지역정보학회지 2(1):293-307.
- 이관수, 박성천, 이연길. 2002. 지리정보시스템과 수문모형 결합에 의한 홍수유출해석. 한국수처리기술연구회지. 10(4):61-70.
- 조홍제, 조인률, 김정식. 1997. TOPMODEL을 이용한 강우-유출 해석에 관한 연구. 한국수자원학회논문집 30(5):515-526.
- 한건연, 김상현. 1996. 지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정. 한국수자원학회논문집 29(4):199-208.
- Beven, K.J. 1997. Topmodel : A Critique. Hydrological Process 11(9):1069-1085.
- Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin 24: 43-69.
- Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1984. Testing

a physically based flood forecasting model(TOPMODEL). Journal of Hydrology 69: 119-143.

Hursh, C.R. and E.F. Brater. 1941. Separating storm hydrographs into surface and subsurface flow. 22: 863-870. [KAGIS](#)