

## 인공배수구역에서의 TOPMODEL의 적용 Application of TOPMODEL at Artificially Drained Watershed

김 상 현\*  
Kim, Sang Hyun

---

### Abstract

A physically based model for rainfall runoff simulation in agricultural watershed equipped with tile drains is presented. This model is developed from the TOPMODEL which is based on the detailed topographic information provided by Digital Elevation Model (DEM). Nine possible flow generation scenarios in the tile drained basin are suggested and used in the development of the model. The model can identify the portions of the hydrograph resulting from tile flow, subsurface flow and surface flow. The performance of the model is assessed through a calibration and validation process. The results of the analysis show that the model describes the physical system well and provides a better insight into the hillslope hydrology of agricultural watersheds with tile drainage.

---

### 요 지

인공배수구역의 강우유출모의를 위한 물리적 수문모형이 DEM으로 표현된 지형정보에 근거한 TOPMODEL로부터 개발되었다. 인공배수구역에서 일어날 수 있는 아홉 가지 유출 발생 시나리오가 제안되었고, 또 이것을 모형의 개발을 위해 사용했다. 모형은 배수관을 통한 유출, 지하수 유출, 지표수 유출 등으로 유출과정을 나누어서 수문거동을 추적할 수 있도록 구성되어 있다. 제안된 모형은 유역의 물리적 특성을 잘 기술하고 있고 수문학적 거동에 보다 향상된 추출능력을 제공해줄 수 있을 것이라고 사료된다.

*Keywords:* hydrology, GIS, tile drained watershed, flow path, TOPMODEL

---

\* 부산대학교 환경공학과 전임강사

## 1. 서 론

소유역에서의 수문학적인 거동은 지형, 지질 혹은 식생의 불균일성으로 인하여 공간적 및 시간적으로 변화가 심하다. 유출과정의 복잡성은 유출경로의 다양성과도 연관이 있는데 강우강도가 침투능보다 커서 일어나게 되는 침투초과유출과정(Horton, 1933)이나 포화지면에서의 강우가 일으키는 포화초과유출과정(Dunne와 Black, 1970)은 대표적인 지표면 유출경로이다. 강우후 유역 내에서 평균 지하수면의 상승으로 인한 지하수유출량의 증가 역시 무시할 수 없는 유출요소중 하나이다. 특히 지표면표고의 공간적 분포상황이 지하수면의 공간적 분포상황에 아주 밀접한 관련이 있다고 연구되어온 바(Dunne 등, 1975; Beven과 Wood, 1983) 수문학적 거동의 공간적 분포 역시 지표면의 공간적 분포상황에 많은 영향을 받는다. 이는 포화초과유출에 기여하는 유역면적이나 지하수흐름의 경로가 시간에 따라 변화한다는 연구결과(Cappus, 1960; Hewlett, 1974)와도 연관성이 있다.

유역에서의 수문학적 반응 특성은 지형이나 토양 등으로 나타내어 질 수 있는 자연 조건이외에도 유역을 특정 목적을 위해 개발이나 변형을 할 때 생길 수 있는 인공적인 조건에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 실제로 미국을 포함한 세계 여러 곳에서는 농작물의 생산량 증가를 위해 유역 전반에 걸쳐 배수관을 설치해 강제 배수를 실시하고 있는 곳이 있다.

이와 같은 강제 배수 유역에서의 수문 특성이 자연 유출 특성을 가지고 있는 유역과의 근본적인 차이점은 배수 이론의 많은 출현을 야기시켰다. Hooghaut's 공식을 이용한 배수관 간격에 관한 연구(Skaggs, 1980)나 tile 배수 효과에 관한 연구(Van Schilfgaarde, 1957)는 DRAINMOD(Skaggs, 1980)나 RZWQM(USDA-ARS, 1992) 같은 모형으로 구체화되었다. 대부분의 배수이론이 지형의 물리적인 조건이나 강우의 연속적 변화성 등 이 고려되지 않는데 반해 TOPMODEL개념에 근거한 인공배수 유역에서의 수문 모형화 연구는 위의 여러가지 개념이 포함된 것으로 GRASS와 연계하여 진행되어졌다(Kim, 1996).

GRASS 시스템 상에서의 지형지수산정(김상현과 한건연, 1996)이나 인공 배수 유역에서의 수문학적 모의(김상현 등, 1996)는 강제배수가 유역 수문 특성에 미치는 영향과 유출 발생 경로를 구체화하는데 도움을 주었다. 유출경로의 추적을 통한 유역에서의 수문학적 접근은 유출수의

수질변동상태를 효율적으로 추적하는데 중요한 근거를 마련해 준다. 이를 위해서는 실제 강우 사상을 사용해서 모형의 거동을 검토하는 것이 필수적이라 사료되는데, 본 연구에서는 확장된 TOPMODEL(김상현 등, 1996; Kim 1996)을 실제 유역에 적용해서 개발한 모형의 타당성을 검토하고, 모형의 유출 경로 추적 능력을 보여줌으로써 수계의 수질 반응 추정 가능성도 조사하는데 주목적을 두었다.

## 2. 관련연구 및 기본이론

비교적 적은 수의 물리적 의미를 가진 계수들만으로도 실용적인 수문모형구성을 위한 여러 연구들은 Kirkby(1975)에 의해 제안되어진 지형지수,  $\ln(a/\tan B)$ , 가 TOPMODEL이라는 완성된 수문모형의 출현으로 구현되어짐으로(Beven과 Kirkby, 1979) 본격적으로 수행되어졌다. 영국 상류부 소유역의 유출 모형화를 위해 처음으로 개발된 TOPMODEL(Beven과 Wood, 1983)은 미국동부(Beven과 Wood, 1983; Hornberger 등, 1985), 뉴질랜드(Robson 등, 1993) 등의 온난다습한 유역에서 우수한 적용성을 검증 받았고, 남부 프랑스의 건조한 유역에서도 성공적인 유출 추적능력을 보여주었다(Durand 등, 1992).

TOPMODEL 개념에 근거한 홍수빈도해석에 관한 연구도 유출경로별 빈도 분포해석(Beven, 1984), 유역별 유출 유사 계수의 제안(Sivapalan 등, 1990)등으로 진행되었다. 특히 지형, 토질 혹은 식생의 공간적 분포를 활용하는 TOPMODEL의 구조와 지형정보시스템(GIS)과의 연계에 관한 연구는 Water Information System에서의 구현(Romanowicz 등, 1993), SPANS 모형 언어를 사용한 연구(Stuart와 Stocks, 1993), GRASS에서의 모형화(Chairat와 Delleur, 1993; Kim, 1996) 등으로 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다.

본 연구의 기반이 되는 TOPMODEL은 다음과 같은 세가지 기본 가정에 근거하여 복잡한 수문 과정을 상당히 간략화시킨 함수적구조로서 체계화된 것이다. 첫째는 유역 내에서의 포화 성향이 정상상태의 가정하에 나타내어 질 수 있다는 것이다. 이는 유역내의 지하수면의 공간적 분포상황이 지형 지수인(Kirkby, 1975),  $\ln(a/\tan B)$ , ( $a$ 는 등고선 길이당 누가면적,  $\tan B$ 는 지표면 경사)로 일컬어지는 유역내의 임의의 지점에서 포화상태가 발생될 수 있는 정도를 나타낼 수 있다는 것이다. 이와 비슷한 가정하에서 출발된 '습도'계수가 제안되기도 했다(O'Langhlin, 1986). 둘째 가정은 유역내 지하수면들의 동수경사가 지표면 경사인,  $\tan B$ 로

표현될 수 있다는 것이다. 따라서, 많은 상위 경사 지역으로부터의 배수 면적과 상대적으로 완만한 경사를 가진 지역은 높은 지형지수, 즉 높은 포화 성향을 보여준다. 셋째 가정은 전달계수가 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수함수적으로 감소한다는 것이다. 이 가정은 토양 투수계수의 자료나 등방가정에서의 투과함수 유도를 통해 검증되어졌다(Beven, 1984). 이를 수식으로 표시하면,

$$T = T_0 \exp(-fz) \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 전달계수,  $T_0$ 는 흙이 포화되었을 때의 가로방향 전달계수,  $Z$ 는 지하 수면까지의 깊이 그리고  $f$ 는 비례 상수이다.

입의 지점에서 연속방정식과 방정식(1)을 조합하여 약간의 수식 전개를 수행하면(김상현 등, 1996) TOPMODEL의 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다(Beven과 Wood, 1983).

$$Z_x = Z + \frac{1}{f} \left( \lambda - \ln \left( \frac{a}{\tan B} \right)_x \right) + \frac{1}{f} (\ln T_0 - \ln T_e) \quad (2)$$

여기서  $Z_x$ 는 입의 지점에서의 지하수면 깊이,  $Z$ 는 유역내의 평균지하수면의 깊이,  $\lambda$ 는 지형지수의 유역내 평균값 그리고  $\ln T_e$ 는  $\ln T_0$ 의 유역내의 평균값을 지칭한다.

위 식에서 유역의 평균지하수면과 유역내 입의 지점에서 지하수면의 차는 지형지수의 평균값과 입의 지점 값의 차와 전달계수의 평균값과 입의 지점 값의 차이로 나타남을 알 수 있다. 이는 지형지수와 전달계수의 공간적 분포 상황을 통해 유역의 공간적 수문거동도 추적할 수 있음을 의미한다.

지하수면, 강우강도 그리고 지표면 침투능의 공간적 분포로부터 다음과 같은 네가지 유출 경로의 발생여부와 크기를 산정할 수 있다.

강우강도가 침투능보다 큰 지역에서는

$$Q_{ Horton } = \sum a_x \frac{i - K_0}{A} \quad (3)$$

지하 수면이 지표면과 같거나 큰 지역에 내리는 경우는

$$Q_{ Dunne } = \sum a_x \frac{i}{A} \quad (4)$$

지하수면의 지표면 초과로 인한 지하수가 지표수로 유출되는 요소는

$$Q_{ return } = \sum a_x \frac{|Z_{n drain}|}{A} \quad (5)$$

그리고 지하수의 하천 유출의 기여는

$$Q_{ subsurface } = (T_0 \tan B)_x \exp(-fz_x) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있는데 여기서  $ax$ 는 각 조건을 만족하는 유역 면적,  $A$ 는 전체 유역면적,  $i$ 는 강우 강도,  $K_0$ 는 지표면 침투능, 그리고  $n_{drain}$ 은 유효 공극율이다.

### 3. 대상 유역

모형의 거동을 평가하기 위해 두 유역이 설정되었다. 첫번째 대상유역은 미국 인디애나주 West Lafayette 근처의 Little Pine Creek(139 km<sup>2</sup>)의 상류부에 위치해 있는 Animal Science Farm Subwatershed(3.6 km<sup>2</sup>)이다. 이 유역은 주로 옥수수나 콩을 재배하는 농업적인 용도로 사용된다. 전 유역이 각각 18인치 24인치의 직경으로 구성된 두 개의 주 배수관과 이와 연결되어 있는 수 많은 보조배수관으로 인공배수되고 있다. 연중기온은 -15℃부터 35℃까지의 변동성을 보이고 있다. 두 번째 대상유역은 미국 일리노이주 중동부에 위치하고 있는 Little Vermillion River Basin의  $B_1$ ,  $B_2$  유역이다.  $B_1$ 과  $B_2$ 유역의 배수면적은 각각 0.12 km<sup>2</sup>과 0.07 km<sup>2</sup>이다. 이들 유역 또한 1 m 깊이의 6 inch 관경을 가진 배수관들로 인공배수되고 있고 연평균 강우량은 1,000 mm에 달한다.

### 4. 인공배수 유역에서의 수문거동

토양 속에서 수분 분포의 적절한 모형화를 위하여 식생의 뿌리근역의 저수효과를 나타내기 위한 root zone, 지하수면과 root zone사이의 불포화상태의 토양구조를 대표하는 unsaturated zone, 완전 포화 영역인 saturated zone으로 나누어지는 강우 침투 과정은 TOPMODEL의 전형적인 토양 모형화 형식이다. 매설된 배수관으로 강제 배수되는 유역의 강우 침투 및 배수관으로의 유출과정은 배수관과 토양층사이의 수분분포 및 압력분포의 고려를 통해 물리적인 근거를 가지고 기술되어 질 수 있다. 지하수면을 기준으로 상부 토양의 불포화상태의 수분은 모세관 현상을 유발시켜 부압상태의 수분분포를 유지시킨다. 한편 배수관망의 출구는 대기상에 노출되어있으므로 배수관내의 기압이 대기압상태에 있음을 가정할 때, 토양내의 수분분포와 배수관거로의 지속적인 토양수분의 전달 조건은 지하수면이 배수관저 이상일 때만이 가능하다는 논리가 성립한다. 이를 근거로하여 지형지수로 계산되는 지하수면까지의 수분결핍, 불포화층의 수분함량, 배수관의 배수효과와

시간별 강우량의 상대적인 크기 조건의 조합으로부터 여러 가지 유출 시나리오가 도출되어진다. 본 연구는 이들 시나리오를 TOPMODEL구조에 접합 확장시킴으로써 유역에서의 수문학적 과정의 연속적이고도 공간적인 기술을 가능하게 하였다. 이는 raster표현양식을 빌어 각각의 cell에 다른 형태의 유출발생 과정을 추적가능케 함으로써 입체적이고도 능동적인 수문현상 추적을 의미한다. 표 1은 유출발생의 아홉가지 가능한 시나리오를 정리하였다.

표 1. 유출발생 시나리오

Case	S.D.	R.E.	Condition	T.F. (old)	T.F. (new)	T.F. (L)	O.F. (R)	O.F. (R.F.)	B.F.
1	+	No	SAT>SUZ	Yes	No	No	No	No	Yes
2	+	No	SAT<SUZ	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes
3	+	Yes	P>DD+SUZ	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
4	-	Yes	P<DD+SUZ	Yes	Yes	No	No	No	Yes
5	-	No	RF>DD	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes
6	-	No	RF<DD	Yes	No	Yes	No	No	Yes
7	-	Yes	RF>DD	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
8	-	Yes	P+RF>DD	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes
9	-	Yes	P+RF<DD	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes

S.D.: Saturation Deficit, R.E.: Rainfall Event,  
T.F. (old): Tile Flow from Old Water  
T.F. (new): Tile Flow from New Water,  
T.F. (L): Tile Flow Lateral Flux  
O.F. (R): Overland Flow from Rainfall,  
O.F. (R.F.): Overland Flow from Return Flow  
B.F.: Base Flow, SAT: Local Saturation Deficit,  
SUZ: Water Contents in Unsaturated Zone  
P: Precipitation, DD: Drawdown by Tile System,  
+: Unsaturated System, -: Saturated System

## 5. 모형의 검증 및 토의

모형의 적용을 위해 실유역자료를 사용한 검증이 실시되었다. 이를 위해 모형의 입력자료를 두종류로 분리하였다. 첫 번째 종류는 평균 투수계수, 배수관의 크기나 깊이 같은 물리적이고도 시간에 따라 불변하는 입력자료이다. 두 번째 종류의 입력자료는 보다 개념적이고 모형의 변화할 수 있는 부분을 나타내 주는 계수들으로써, 예를 들면 깊이에 따라 감소하는 투수계수의 비 같은 것이다. 이들 계수는 각각의 모의실험에서 재산정 되어야 하는 것으로 시간에 따라 변화하는 유역에서의 수문학적 정보를 내포하고 있다. 이 연구에서 쓰여진 각종계수들은 표 2에 나타났다. 침투능 비례계수(m), 침투능(sko), 초기 지하수위 강하효과(ds), root zone 통과 흐름비(pmax)같은 변동성 입력자료는 수문모의의 보정을 통해 확보될 수 있는 반면에, 유역면적(shed), 지형지수(atb, numatb)이나 배수관별 배수면적비(pro) 등은 측정이나 계산을 통해 확보될 수 있다. 모형의 적용을 통한 검증은 다음과 같은 다섯가지 과정으로 구성되었다.

- (1) 유역의 특성을 나타낼 수 있는 불변성 입력자료의 확보
- (2) 변동성 입력자료의 기준치 설정
- (3) 변동성 입력자료의 적정치 결정
- (4) 결정된 입력자료를 사용하여 모형의 적용성 입증
- (5) 여러 가지 흐름발생 시나리오를 고려한 모의실험의 해석

이와 같은 과정은 물리적인 수문계통에 대한 보다 개선된 추출능력을 제공해 줄 수 있을 것으로 사료되며

표 2. 모형 입력자료

기 호	정 의	단 위	특 성
m	Hydraulic conductivity scaling parameter	m	변동성
sko	Hydraulic conductivity at surface	m/hr	변동성
srmax	maximum root zone storage	m	변동성
qin	Initial discharge	m/hr	변동성
ds	Average initial tile drainage drawdown	m	변동성
pmax	Fraction of precipitation bypassing root zone	.	변동성
shed(array)	Areas of subwatersheds	m <sup>2</sup>	확정성
atb(array)	Topographic index values	.	확정성
numatb(array)	The number of cells in each atb(array)	.	확정성
ndrain	Drainable porosity	.	확정성
not	Number of tile drainage system	.	확정성
deptil(array)	Depth to the invert of tile system	m	확정성
velo	Flow velocity within the tile	m/s	확정성
pro(array)	Proportion of watershed covered by tile system	.	확정성
radi(array)	Radius of tile	m	확정성
Ksto(array)	Storage coefficient of the soil matrix	hr	확정성
Ktile(array)	Storage coefficient of tile system	hr	확정성

배수관의 수문학적 반응에 대한 효과도 평가해 줄 수 있다. 특히 수질 반응과 관련하여 각각의 계수와 반응계통과의 연관관계가 비점원 오염의 발생과 전달 과정을 규명하는 데도 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.

지표고도의 공간적 분포(DEM)는 GRASS(USCERL, 1991)를 통해 Data Base화 되었다. 지형지수의 공간적 분포는 단방향흐름 알고리즘(Jenson과 Dominique, 1988)이나 다방향흐름 알고리즘(Quinn, 1991)을 이용하여 계산되어 질 수 있다. 단방향흐름 알고리즘은 지하수의 흐름이 주어짐으로부터 가장 급한경사를 이루는 방향으로 이루어진다는 가정하에 구성된 반면에, 다방향흐름 알고리즘은 모든방향으로 부터 한 지점으로의 흐름의 집중이나 확산을 허용하는 구조를 가지고 있다. 이와 관련하여 Moore(1995)는 다방향흐름 알고리즘이 지형지수의 계산에 있어서 단방향흐름 알고리즘보다 향상된 결과를 보여준다는 연구결과를 발표하였다. Wolock와 McCabe(1995)는 계산 방식이 지형지수의 공간적 통계적 분포에 영향을 주지만, TOPMODEL모의시 효율성이나 모의 흐름경로에 대한 효과는 미소하다는 연구 결과를 발표하였다. 완만한 경사(4°)가 지형경사의 대부분을 이루는 본 연구 대상 유역에는 지형지수의 공간적, 통계적 분포 상황이 Quinn 등(1991)이 제안한 다방향흐름 알고리즘을 적용하여 계산되었다. DEM은 Animal Science Farm Subwatershed의 경우 GRASS상에서 30m×30m의 Pixel로써 (93×147)크기 유역을 대상으로 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>유역의 경우 6m×6m의 pixel로 각각 (47×62), (47×31) 크기의 유역을 대상으로 계산이 실시되었다(김상현과 한건연, 1996). 또한 인공 배수효과를 고려한 인공적으로 변조된 DEM(김상현과 한건연, 1996)을 사용하였으므로 와지의 효과를 최소화하였다. 다방향흐름 알고리즘의 GRASS상에서의 적용은 Chairat과 Delleur(1993), Kim(1996) 등에 의해 연구되었다. 배수관의 물리적

특성을 나타내는 자료들과 토양 투수능들이 수집되어졌고 초기 유량은 유역출구에서 측정된 초기 수위로 부터 환산되어 졌다. 모형의 보정과 검증에 위해 Animal Science Farm유역의 강우사상들이 주의 깊게 선정되었다. 이들 사상들은 연중 기온이 영상인 동시에 각기 계수들이 가능한 변화를 잘 대표할 수 있게 선정되었다. 이들 사상은 표 3에 기술되어 있는데, 강우 사상 1, 2, 3, 4는 모형 보정을 위해, 강우 사상 5, 6, 7, 8은 모형검증을 위해 쓰여졌다. 인공배수 유역의 수문학적인 거동은 강우사상의 강도와 양에만 관련되지 않고 유역의 인공적 사용, 배수 효과, 초기 포화 결핍 상태 등에도 관련이 깊다. 이 연구의 물리적 접근 방식은 이들 조건들을 몇 가지 변동성 입력자료로 효과적으로 모형 구조에 집목시킬 수 있다고 사료된다.

변동 계수들의 개략적인 추정은 계수들의 수치가 물리적으로 타당한 범위안에서 Monte-Carlo 방법을 이용하여 실시되었다. 즉 배수효과로 인한 초기 지하수위 강하효과(dz)는 0.3(m)에서 1(m)까지로, 지표면 침투능(sko)은 0.005(m/hr)에서 0.03(m/hr)까지로 최대 root zone 저수량(srmax)은 0.04(m)에서 0.01(m) 사이로, root zone통과흐름비(pmax)는 10%(0.9)에서 30%(0.7)사이의 범위를 대상으로 난수 발생을 통한 변동계수를 사용한 모의와 관측치의 비교를 각각의 수문사상에 대해 500회씩 반복함으로써 적정계수를 추정하였다. 표 4에는 Nach-Sutcliffe(1970)계수가 90%이상을 보여주는 계수값들이 나열되었다. 유역의 초기 포화상태가 알려지지 않은 상태이기 때문에 다른 조합의 변동 계수들이 이 계산 결과와 유사하거나 더 성공적인 결과를 보일 수도 있다고 사료된다. 그림 1은 계산된 수문사상과 관측된 수문사상의 비교를 나타냈는데 이 모형이 수문사상을 잘 추적하고 있음을 보여준다. 또한 일점쇄선으로 표시된 배수관유출의 모의 결과가 점선으로 표시된 유역출구에서 유출 측정치와 거의 일치하고 있으므로 배수관의 인공배수 요소가 전체 수문 사상의 주요한 부분을 구성하고 있음을 알 수 있다. 그림 2는 강우사상 3에 관한 모의

표 3. 선정된 강우사상

강우사상	발생일	총강우량(in)
1	1994.08.10	1.06
2	1994.11.07	0.85
3	1994.11.29	2.01
4	1994.12.12	0.93
5	1994.06.23	0.91
6	1993.11.12	0.96
7	1993.11.16	0.74
8	1993.10.14	1.68

표 4. 모형산정에 사용된 변동성계수

날짜	m	sko	srmax	pmax	$\frac{dz(m)}{ds/ndrain}$
1994.08.10	0.001	0.01	0.035	0.87	0.5
1994.11.07	0.001	0.01	0.02	0.85	0.5
1994.11.29	0.002	0.018	0.02	0.7	0.5
1994.12.12	0.0025	0.01	0.02	0.7	0.5

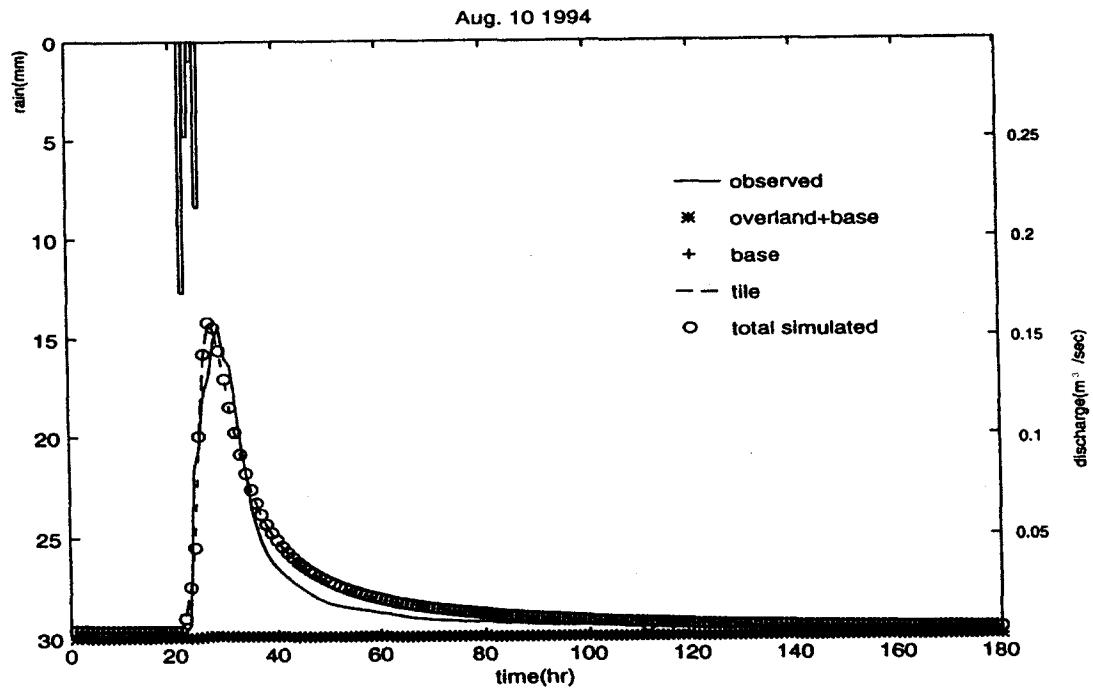


그림 1. 모형의 보정을 위한 강우유출모의

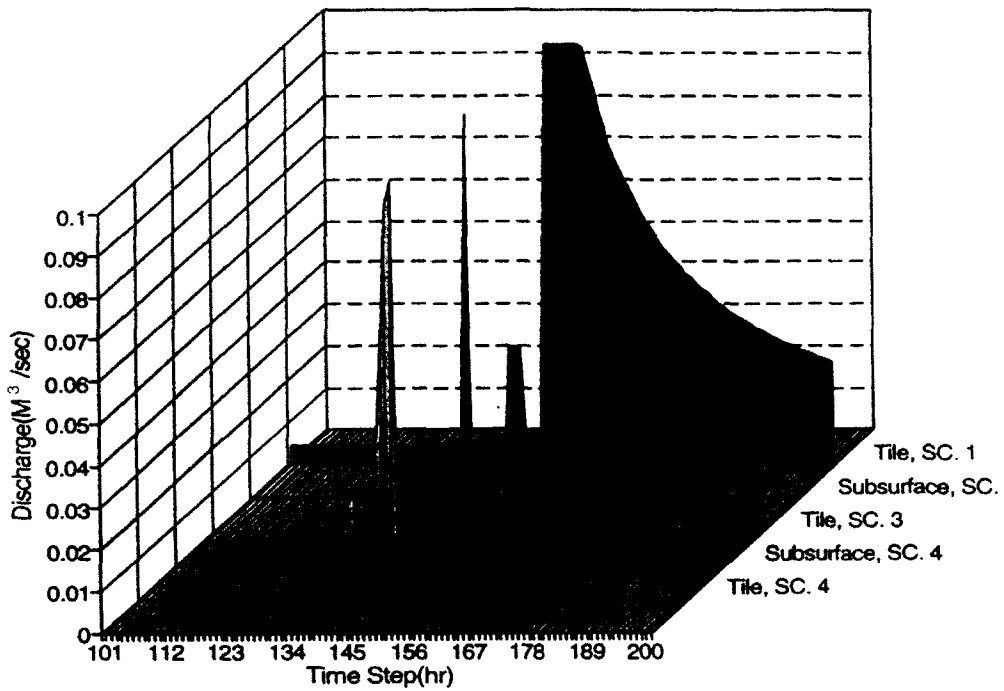


그림 2. 강우사상 3에 대한 유출경로별 모의결과

결과를 각각의 유출발생시나리오로 부터 추적된 유출경로 별로 나타내었다. 이 그림은 수문곡선이 시나리오 1, 시나리오 3 그리고 시나리오 4에서 기인된 유출요소로 구성되어 있고 상당부분의 유출이 시나리오 1로 구성된 배수관 유출이라는 것을 보여주고 있다. 또한 시나리오 3으로 부터 기인되는 지표면 유출이 포화초과 유출과정을 통해 유출에 기여함을 의미한다.

실제 사상의 모의를 통한 모형의 유출예측 능력의 검증은 표 3에서 모형 보정에 쓰이지 않은 강우사상들로 실시되었다. 각각의 모의에서 사용한 변동계수들은 모형 보정 과정과 계절적으로 유사한 시기의 변동계수들이다. 적합한 유역 초기 포화 조건을 만족하기 위해 초기 유출량을 근거로 한 몇가지 초기유역 포화정도가 모의에 사용되어졌다. 작물이 토양수분분포에 미치는 영향은 초기 상태의 root zone과 unsaturated zone에서의 수분분포예측에 많은 어려움을 가져온다고 사료된다. 표 5는 보정과 검증과정에서 나타난 모의결과들의 결정계수( $r^2$ )들을 나열하였다.

모형의 검증결과중 하나의 모의결과가 그림 3에 보이듯이 관측된 수문사상과 계산된 수문사상이 약간 불일치를 보이지만 모형이 수문사상의 형태의 대략적인 예

표 5. 모의결과들의 결정계수( $r^2$ )

강우사상	발생일	$r^2$
1	1994.08.10	0.91
2	1994.11.07	0.95
3	1994.11.29	0.85
4	1994.12.12	0.87
5	1994.06.23	0.71
6	1993.11.12	0.70
7	1993.11.16	0.82
8	1993.10.14	0.73

측에도 성공적으로 사용되어질 수 있다고 사료된다. 이와 같은 관측결과와 계산결과와의 차이는 root zone이나 unsaturated zone의 초기상태가 불확실함에 기인된다고 사료된다.

모형은 Little Vermillion River 유역에 위치해 있는 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>지역의 연속적인 수문사상에도 적용되어졌다. 이 적용은 연속적인 강우자료를 사용했다는 점에서 위의 시험과는 다르다. 1992부터 1995년까지의 모든 수문사상이 모의에 사용되었다. 모형의 배수관 유출 추적능력은 시간에 따른 변동성을 보여주는데, 비교적 Penman 방법에 의한 증발산량 산정의 신뢰성이 높은 기간에는 관측치와 계산치가 잘 일치함을 보여주었다. 그림 4 는

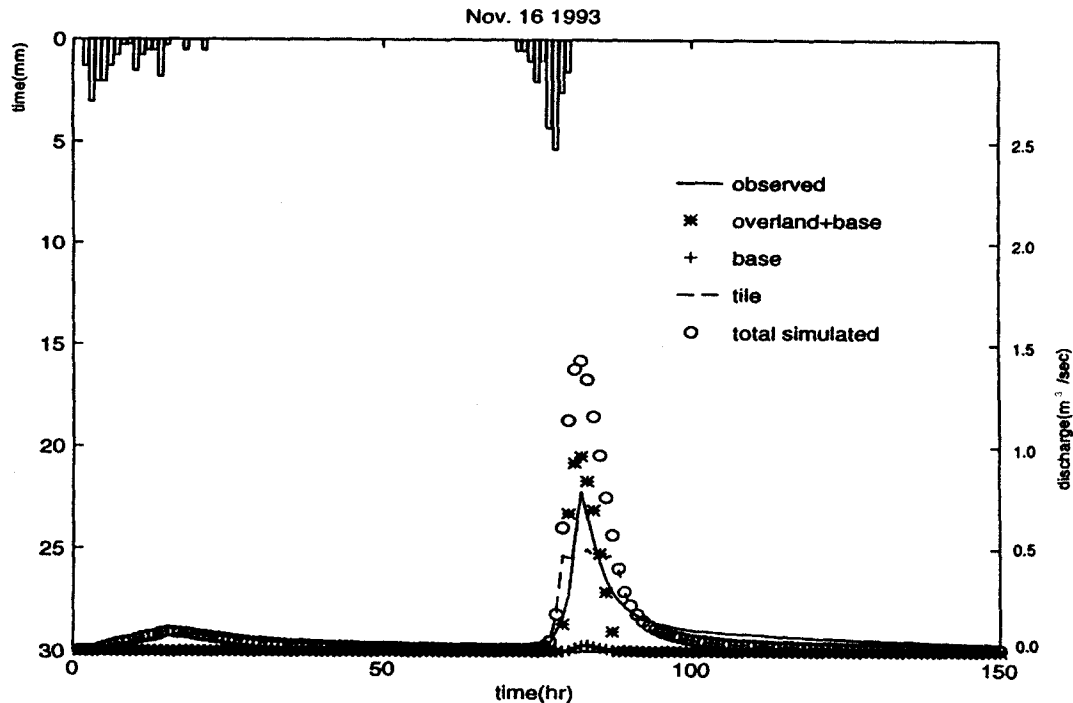


그림 3. 모형의 검증을 위한 강우유출모의

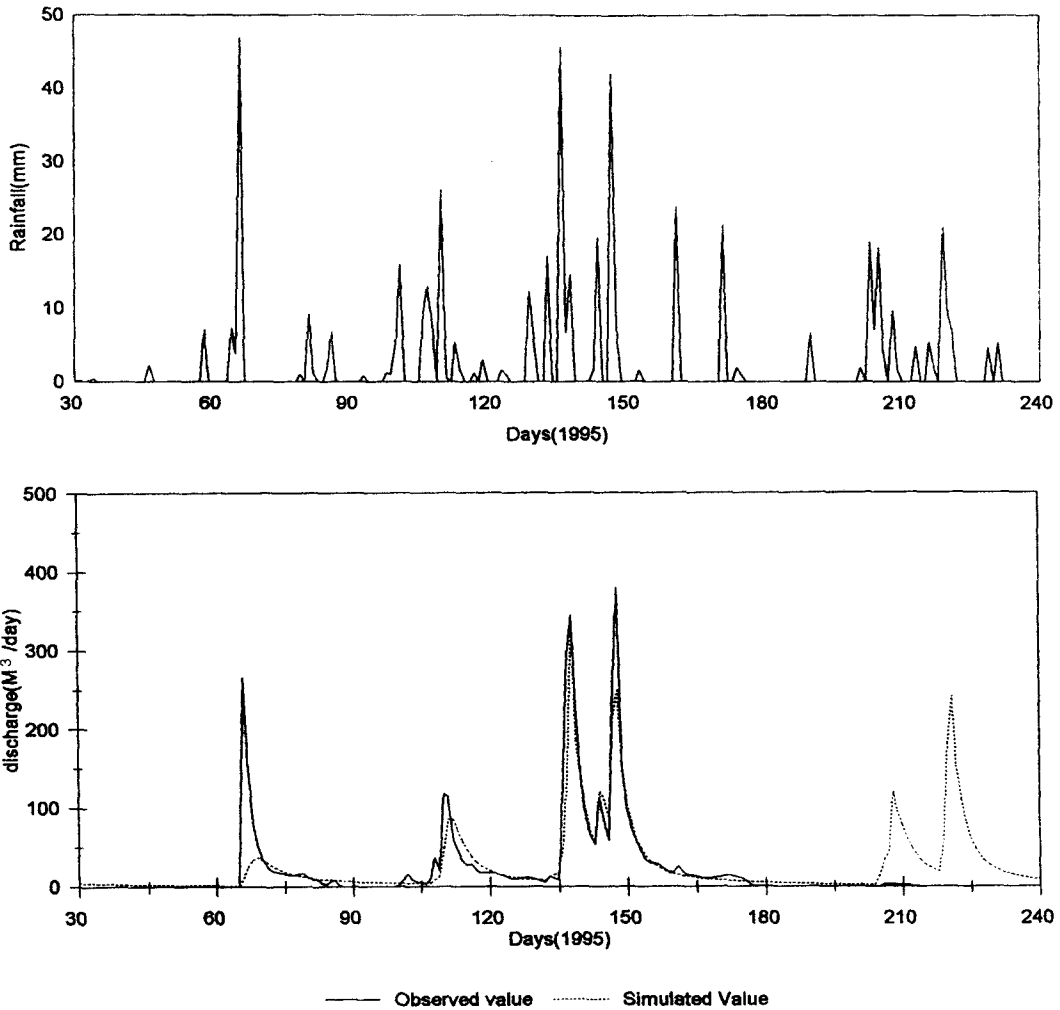


그림 4. 1995 B<sub>1</sub> 지역 강우 사상 및 배수관유출의 관측치와 계산치

1995년의 B<sub>1</sub>지역에 대한 강우사상을 나타냈고 배수 관에서의 유출량의 관측치와 모형의 추정치를 비교한 것으로 모형이 작물의 가장 왕성한 성장기간인 4월초 (90 day)부터 6월말(180 day)까지의 유출량을 잘 추적하고있음( $r^2=0.9$ )을 보여준다. 이는 모형에 사용되는 변동성계수들이 이 기간동안의 수문학적 특성을 보다 잘 대표하고 있는 것으로 사료된다. 이는 계수들의 변동성과 유역의 수문학적 특성의 변동성의 연관성을 의미한다. 210 day 이후의 불일치는 증발산량산정이나 모형의 변동성계수의 불확실성으로부터 기인된 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구는 인공배수 유역에서는 강수에 대한 유출을 모의하기 위한 TOPMODEL로 부터의 확장에 대하여 기술한 것이다. 이는 지형, 토양, 토지이용 및 인공 배수의 효과를 고려하여 실시되었다. DEM으로부터 지형 지수가 계산되었고, 여러 가지 조건에 따른 아홉까지 유출발생 시나리오로부터 계산되도록 구성되어졌다. 모형은 Little Pine Creek과 Little Vermillion River 유역의 작은 소유역들에서 검증되었다. 모형의 산정과 검증과정을 통해 모형이 물리적 수계를 잘 표현하고 있으며, 인공배수유역에서 유역의 물리적 특성을 고려한 강우유출 모형으로 사용될 수 있음을 보여주었다.



## 참 고 문 헌

- 김상현, 한건연 (1996). "지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정." *한국수자원학회지*, 제29권, 제4호, pp. 199-208.
- 김상현, 손광익, 한건연 (1996). "Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지유역에 대한 수문학적 모의." *한국수자원학회지*, 제29권, 제6호, pp. 203-215.
- Beven, K.J. (1984). "Infiltration into a class of vertically non-uniform soils." *Hydrological Science Journal*, Vol. 29, pp. 425-434.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrologic Science Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Beven, K.J., and Wood, E.F. (1983). "Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas." *Journal of Hydrology*, Vol. 65, pp. 139-158.
- Cappus, P. (1960). "Bassin versant experimental d'Alrance." *La Houille Blanche*, Vol. A, pp. 493-520.
- Chairat, S., and Delleur, J.W. (1993). "Integrating a physically based hydrological model with GRASS." *Hydro GIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*, IASH Pubn. No. 211, pp. 143-150.
- Dunne, T., and Black, R.D. (1970). "Partial area contributing to storm runoff in a small New England watershed." *Water Resour. Res.*, Vol. 6, No. 5, pp. 1296-1311.
- Dunne, T., Moore, T.R., and Taylor, C.H. (1975). "Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions." *Hydrological Science Bulletin*, Vol. 20, pp. 305-327.
- Durand, P., Robson, A., and Neal, C. (1992). "Modelling the hydrology of submediterranean montane catchments using TOP-MODEL: initial results." *Journal of Hydrology*, Vol. 139, pp. 1-14.
- Hewlett, J.D. (1974). "Comments on letters relating to role of subsurface flow in generating surface runoff. 2. upstream source areas." *Water Resour. Res.*, Vol. 10, pp. 605-607.
- Hornberger, G.M., Beven, K.J., Cosby, B.J., and Sappington, D.E. (1985). "Shenandoah watershed study: Calibration of a topography based, variable contributing area hydrological model to a small forested catchment." *Water Resour. Res.*, Vol. 10, pp. 1841-1850.
- Horton, R.E. (1933). "The role of infiltration in the hydrologic cycle." *Eos Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 14, pp. 446-460.
- Jenson, S.K., and Dominique, J.O. (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system." *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, Vol. 54, pp. 1595-1600.
- Kim, S. (1996). "Hydrologic and water quality modeling of agricultural watersheds equipped with tile drains using a geographic information system and fractal concepts." Ph. D. dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, U. S. A.
- Kirkby, M.J. (1975). "Hydrograph modelling strategies." *Process in Physical and Human Geography*, Heinemann, pp. 69-90.
- Moore, I.D. (1995). "Hydrologic modeling and GIS in GIS and environmental modeling." *Progress and Research Issues*, GIS World, Inc, Fort Collins, Colo.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River forecasting through conceptual models: Part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- O'Loughlin, E.M. (1986). "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, pp. 794-804.
- Quinn, P., Beven, K.J., Chevallier, P., and

- Planchon, O. (1991). "The prediction of hillslope flow path for distributed hydrological modelling using digital terrain models." *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 59-79.
- Robson, A.J., Whitehead, P.G., and Johnson, R.C. (1993). "An application of a physically based semidistributed model to the Balquhider catchments." *Journal of Hydrology*, Vol. 145, pp. 357-370.
- Romanowicz, R., Beven, K.J., and Moore, R.V. (1993). "GIS and distributed hydrological models." *Geographic Information Handling - Research and Applications*, Edited by Mather, P.M., Wiley, Chichester, pp. 197-205.
- Sivapalan, M., Wood, E.F., and Beven, K.J. (1990). "On hydrological similarity: 3. A dimensionless flood frequency distribution." *Water Resour. Res.*, Vol. 26, pp. 43-58.
- Skaggs, R.W. (1980). "Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables." *DRAINMOD: Reference Report*, Fort worth, TX: USDA-SCS.
- Stuart, N., and Stocks, C. (1993). *Hydrological modeling within GIS: An integrated approach*, in *HydroGIS 93: Application of geographic information systems in hydrology and water resources*. IAHS Publ. No. 211, pp. 319-329.
- U.S. Department of Agriculture - Agricultural Research Service (1992). *Root zone water quality model, version 1.0 - User manual*. GPSR Technical Report No. 3. Fort collins, CO: USDA-ARS-NPA.
- USACERL (1991). GRASS 4.0 user's reference manual. Urbana-Champagin, IL.
- Van Schilfhaarde, J. (1957). "Approximate solutions to drainage flow problems." *Drainage of agricultural lands*, Edited by Luthin, J. L., American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Wolock, D.M. and McCabe G.J., Jr. (1995). "Comparison of single and multiple flow direction algorithm for computing topographic parameters in TOPMODEL." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 1315-1324.

〈최종본 접수일 : 1997년 9월 4일〉