

## 격자기반의 운동파 강우유출모형 개발(II)

- 적용 예(연천댐 유역을 대상으로) -

### Grid-Based KIneMatic Wave STOrM Runoff Model (KIMSTORM)(II)

- Application(Applied to Yoncheon Dam Watershed) -

김 성 준\* / 채 효 석\*\* / 신 사 철\*\*\*

Kim, Seong Joon / Chae, Hyo Seok / Shin, Sa Chul

---

#### Abstract

The grid-based KIneMatic wave STOrM Runoff Model (KIMSTORM) was applied to YoncheonDam watershed (1,875 km<sup>2</sup>) located in the Imjin river basin of the Korea. Six maps which are DEM(Digital Elevation Model), stream, flow path, soil, land use and Thiessen network, were used for input data. The simulated streamflows resulting from two selected storm events agreed well with the observed flows at the watershed outlet. The results of temporal variations and spatial distributions are presented by using GRASS.

*Keyword* : grid-based, storm-runoff model, GRASS-GIS, Yoncheon dam watershed

---

#### 요 지

개발한 격자기반의 운동파 강우-유출모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 임진강유역내의 연천댐 유역(1,875 km<sup>2</sup>)에 적용하였다. 모형의 입력자료로는 수치고도모형, 하천도, 흐름방향도, 토양도, 토지피복도, 티센망도 등 6개의 도형자료를 이용하였다. '90년 및 '96년도에 발생한 홍수사상과 비교하였는 바, 모형의 결과는 양호하였다. 출력결과인 시간별 지표유출 분포도로부터 유역에서 발생된 유출양상을 공간적으로 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 격자기반, 홍수유출모형, GRASS-GIS, 연천댐 유역

---

\* 건국대학교 농공학과 조교수

\*\* 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

\*\*\* 안동대학교 토목환경공학과 전임강사

## 1. 서론

분포형 수문모형의 현 위상에 크게 기여한 논문들 (Beven, 1987, 1989ab, 1993)과 분포형 모형의 적용을 도모했던 논문들(예, Bathurst, 1986; Bathurst and O'Connell, 1992)을 찾아볼 수 있다. 이들은 수문순환의 실제과정들을 공간적으로 묘사·구성하는 기본적인 문제를 제시한데 그 의미가 크다고 말할 수 있겠다. 한편 유역규모에서 유출을 예측하는데 있어 성공적으로 평가받고 있는 SHE나 IHDM 등과 같은 모형들이 그 예라 할 수 있다. 이들은 적용성이 높고 최소한 수문예측결과를 받아들일 만하다는 것이다 (Bathurst, 1986; Calver, 1988). 그러나 수문과정의 내부상태변수들을 예측하는 경우 유출모형으로서 검증과정을 거친 모형은 아직 손으로 꼽을 정도이다.

본 연구에서는 개발된 모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 임진강유역의 일부인 연천댐 유역(1,875 km<sup>2</sup>)을 대상으로 모형을 적용하였다. 대상강우로는 동송, 연천, 포천 강우관측소의 1990년 9월 10일~9월 13일간 강우량(유역 평균강우량 : 271.7 mm)과 김화, 동송, 연천, 포천 강우관측소의 1996년 7월 26일~7월 28일간 강우량(유역 평균강우량 : 644.7 mm)을 적용하였으며, 댐지점으로의 실측 유입량자료를 이용하여 모형의 매개변수들을 결정하였다.

## 2. 자료의 준비

개발된 격자기반의 강우-유출모형을 적용하기 위하여 준비한 도형 자료는 기본도로서 수치고도모형이며, 주제도로는 유역경계도, 토양도, 토지피복도, 티센망도이다. 하천도와 흐름경로도는 GRASS의 r.watershed 명령어를 이용하여 수치고도모형에서 자동생성하였다. 다음은 도형자료별 자료의 근거 및 획득 방법을 정리한 것이다. 도형자료의 획득을 위하여 PC ARC/INFO Ver. 3.4.2, ER MAPPER Ver. 5.5, IDRISI Ver. 2.0을 사용하였으며, 이들은 모두

GRASS ASCII 형태로 전환시켜 모형의 입력자료로 제공된다.

### 2.1 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)

수치고도모형은 미국의 Defense of Mapping Agency에서 제작·보급한 것으로서, 경위도 3초 크기의 격자에 대한 평균지반 고도값이 ASCII 형태로 저장되어 있는 정수자료이다. 우리나라의 경우 3초 간격 격자의 가로 방향 크기는 75 m이며, 세로 방향 크기는 95.5 m이다.

본 연구에서는 이 수치고도모형을 MS-Windows 95용 IDRISI에서 UTM(Universal Transverse Mercator) 좌표계로 변환하고 resampling과정을 거쳐 361,011 m×423,163 m 크기의 격자로 재생성시켰다. Fig. 1은 IDRISI에서 연천댐 유역경계로 clipping한 DEM(213행×129열)을 보여주고 있다.

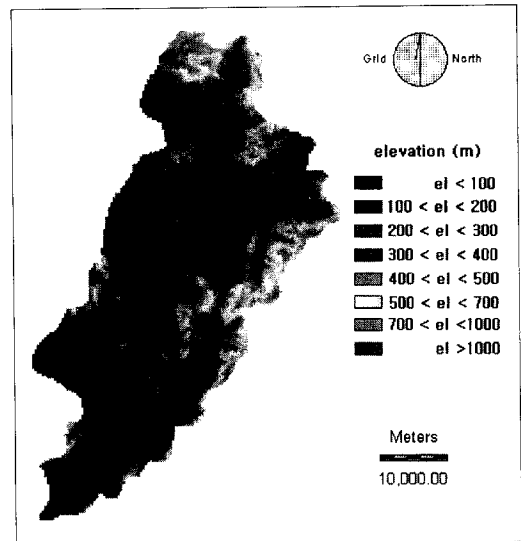


Fig. 1. DEM of Yoncheon Dam Watershed

Table 1. Mapsets Prepared in This Study

구분		자료원	축척	획득방법
기본도	수치고도모형	D.M.A.	경위도 3초 간격	IDRISI
주제도	유역경계도	국립지리원	1:50,000	PC ARC/INFO
	토양도	농촌진흥청	1:250,000	PC ARC/INFO
	토지피복도	LANDSAT TM	30×30 m <sup>2</sup>	ER MAPPER
	티센망도	국립지리원	1:50,000	IDRISI

Note) D.M.A.: U.S. Defense of Mapping Agency

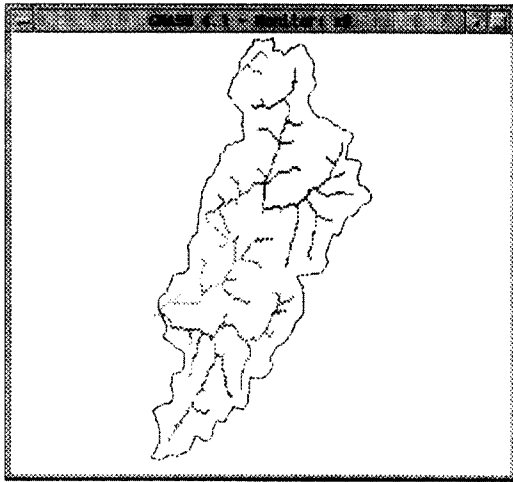


Fig. 2. Generated Stream Map of Yoncheon Dam Watershed

## 2.2 하천도

하천도는 DEM자료를 GRASS로 불러들여 r.watershed 명령어를 이용하여 생성시켰으며, 이는 Fig. 2와 같다. r.watershed 사용시에 threshold는 해당격자가 하천이라고 정의하는데 필요한 최소배수면적을 의미하는데, 이 값을 감소시키게 되면 보다 조밀한 하천을 생성시킬 수 있다.

## 2.3 흐름방향도

흐름방향도는 GRASS의 r.watershed를 사용하여 drainage map을 생성시키면 되며, 각 격자는 1~8까지의 방향값을 가지게 된다. 만약 격자값이 -1의 값을 가지면 그 격자는 와치(sink)를 나타내는데, 이를 제거하기 위하여 IDRISI에서 3×3 low-pass filtering 처리한 DEM을 GRASS로 불러들여 사용하였다. 한편 흐름방향도가 제대로 생성되었는지 확인하기 위하여 간단한 FORTRAN 프로그램을 작성하여 연천댐 유역의 흐름방향도를 출력하였는 바, 하천 중의 일부가 연결되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 유역에서 흐름방향이 불완전하게 생성된 격자를 보완하기 위하여 r.watershed의 accumulation map을 이용하였다. accumulation map은 각 격자를 통하여 배수되는 격자의 수를 누가시켜 나타낸 것이다. 이미 생성시켜 놓은 drainage map을 accumulation map으로 보완하는 프로그램을 작성하였는데, 누가격자수가 많은 격자의 방향으로

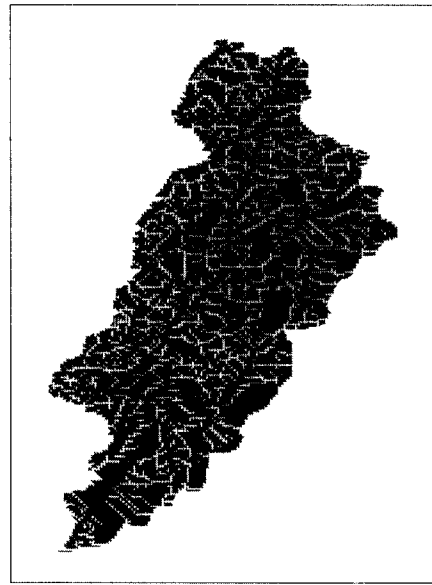


Fig. 3. Flowpath Map of Yoncheon Dam Watershed

흐름방향을 수정하도록 하였다. Fig. 3은 이를 이용하여 하천이 모두 연결된 흐름방향도를 보여주고 있다.

## 2.4 토양도

토양도는 농촌진흥청 토양물리과에서 제작된 남한지역의 토양도(1:250,000)로부터 구축하였다. ARC/INFO 자료를 DLG 파일형태로 변환시킨 후, 이를 IDRISI로 불러들여 원래 토양부호별로 입력된 자료를 사토, 사양토, 양토, 식양토, 식토 암석지역 등의 토양종류별로 재분류(RECLASS)하였다(Fig. 4). 이는 모형에서의 유효공극률, 포장용수량, 토양깊이, 포화투수계수, 침투식의 매개변수들을 결정하는데 사용된다.

## 2.5 토지피복도

토지피복도는 1992년 6월 2일에 획득된 LANDSAT TM 자료(path : 116 / row : 33)를 분석하여 추출하였다. 본 연구에서는 대상지역을 크게 산림, 경작지, 주거지, 나지, 수역 등 5개의 교사자료를 선택하여 최대우도법(maximum likelihood)을 이용·분류하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 이는 지표면흐름에서의 Manning 조도계수를 결정하는데 사용된다.

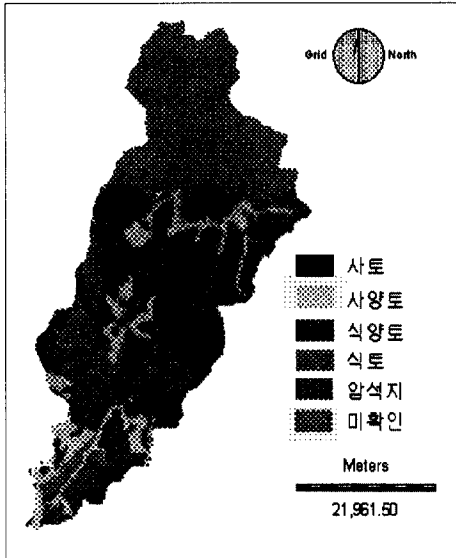


Fig. 4. Soil Map(1:250,000) of Yoncheon Dam Watershed Reclassified by Soil Type

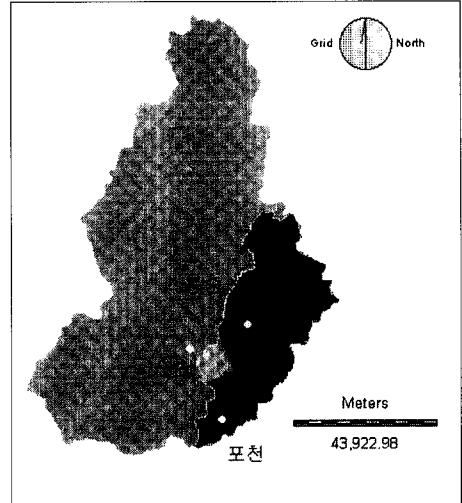


Fig. 6. Thiessen Network Map of Yoncheon Dam Watershed

성시켰다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 모형의 실행조건 및 적용 매개변수

본 모형의 격자한계는 TGSTATION ULTRA-1S 워크스테이션에서 약 40,000개 (200×200)인 것으로 나타났다. 모형의 계산시간간격은 1분으로 하였고, 출력은 1시간 간격으로 자동생성시키는 상태에서 계산기간(65시간)에 대한 컴퓨터 수행시간은 약 30분정도 걸렸다. 1990년 9월 10일~13일의 강우사상에 대한 토양 매개변수들을 정리하면 Table 2와 같다. 초기토양수분( $SM_{ini}$ )은 토양별로 유효공극률( $PO_e$ )의 80%로 주었으며, Manning 조도계수는 THALES 모형(Grayson 등, 1996)에서 Coweeta 유역 (17 km<sup>2</sup>) 적용시에 사면에서 0.1~0.4의 범위로 제시한 바 있어 이를 참고하였는데, 토지피복에 관계없이 지표흐름인 경우는 0.40, 하천흐름인 경우는 0.06으로 보정되었다. 이는 대상유역의 대부분이 산림지역이고, 일부 경작지로 구성되어 있어 지표흐름이 거의 산림에 지배됨을 알 수 있었으며, 경작지와 나지 등의 조도계수를 크게 변화시키지 않는 한 모형의 결과에는 그다지 영향을 주지 않았다. 유효공극률과 포장용수량( $F_c$ )은 Rawls 등(1982)의 자료를 인용하였다. 토양 깊이, 포화투수계수, 초기침투율, 최종침투율 등은 시행착오법으로 결정하였는데, 최적치라고 판단되는 범위내

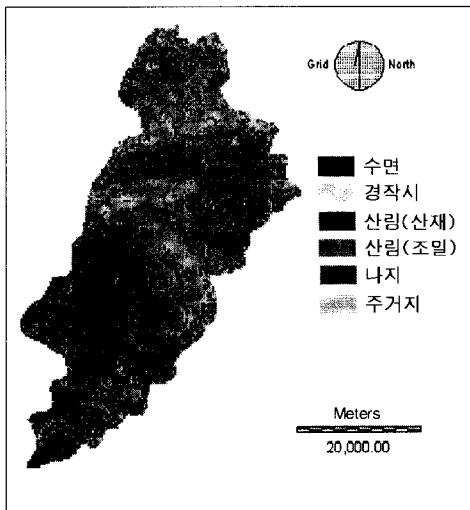


Fig. 5. Land Use Map of Yoncheon Dam Watershed from LANDSAT TM Scene (06/02/92, Path 116 / Row 33)

#### 2.6 티센망도

강우관측소의 경위도 좌표를 이용하여 IDRISI에서 강우관측소 위치도를 vector map으로 작성한 후, THIESSEN을 이용하여 연천댐유역의 티센망도를 생

Table 2. Soil Parameters Used and Calibrated for the Storm Event(09/10/90 ~ 09/13/90)

soil type parameters	sand	sandy loam	clay loam	clay	rocky soil
PO <sub>c</sub>	0.417	0.412	0.390	0.385	0.600
F <sub>c</sub>	0.068	0.113	0.215	0.226	0.085
D <sub>c</sub> (m)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
K <sub>s</sub> (m/day)	200	200	200	200	200
f <sub>c</sub> (mm/hr)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
f <sub>i</sub> (mm/hr)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
b	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65

Note) PO<sub>c</sub>: effective porosity, F<sub>c</sub>: field capacity, D<sub>c</sub>: soil depth, K<sub>s</sub>: saturated hydraulic conductivity, f<sub>c</sub>: final infiltration rate, f<sub>i</sub>: initial infiltration rate, b: soil constant

에 들어서면 이들 매개변수들을 많이 변화시키지 않는 한 모형의 결과에는 크게 영향을 주지 않았다. 모형의 민감도분석 결과, Manning 조도계수, 초기침투율, 최종침투율, 초기토양수분 순으로 모형의 결과에 민감한 것으로 나타났다. 이상 보정된 모형의 매개변수들을 토대로 다른 강우사상에 적용할 경우에는 초기토양수분 조건만을 변화시키면 된다. 그러나 모형의 매개변수들은 적용구역의 규모, 격자의 크기, 이들의 조합, 레이더강우와 같은 공간강우자료의 사용 등에 따라 달리 보정될 수도 있을 것으로 생각된다. 격자크기는 고정시킨 상태에서 유역규모를 줄이면 줄일수록 해당구역의 정보는 손실되어 총괄형모형(lumped model)으로 접근할 것이며, 모형의 매개변수들은 대표성을 띠게 되며, 반면에 주어진 유역규모에서 격자의 크기를 줄이면 줄일수록 유역내의 정보는 증가하여 분포형모형으로 되며, 모형의 매개변수들은 불확실한 값들의 조합으로 이루어지게 된다.

### 3.2 연천댐 지점에서의 댐 유입량 비교

연천댐 지점에서의 댐 유입량자료와 댐지점 격자(138행×5열)에서 모의발생된 유출량을 비교하면 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. Fig. 7의 결과를 보면, 실측 및 모의발생된 침투홍수량의 각각 3439.1 m<sup>3</sup>/sec, 3496.1 m<sup>3</sup>/sec, 침투시간은 일치하였으며(29시간), 총 유출량은 각각 391×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 374×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>으로 나타났다. 유출감소구간에서 모형에 의한 유출량이 실측유출량보다 작게 모의발생되었는데, 이는 북한지역 토양정보의 부재, 토양의 물리적인 매개변수(토양깊이, 포화투수계수 등)를 임의로 가정하므로써 지표하흐름에서 발생하는 오차, 격자내에서 발생하는 실제 흐름(sheet flow and rill flow)과 모형에서 가정한 흐름(sheet

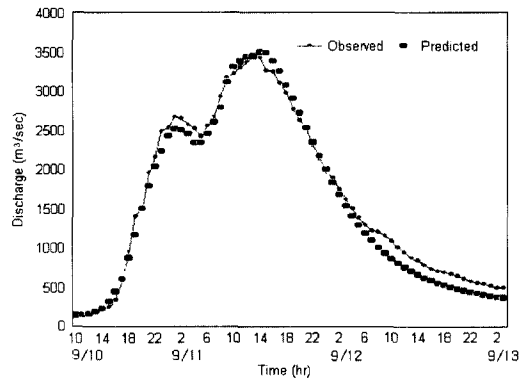


Fig. 7. Observed and Predicted Storm Runoff at the Inlet of Yoncheon Dam (9/10/90 10:00~9/13/90 3:00)

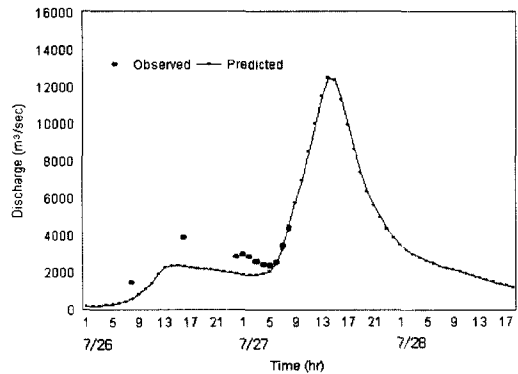


Fig. 8. Observed and Predicted Storm Runoff at the Inlet of Yoncheon Dam (7/26/96 01:00~7/28/96 18:00)

flow)의 차이, LANDSAT TM으로부터의 토지피복도를 수치고도모형의 격자크기에 맞게 resampling 하

면서 발생하는 오차 등으로 생각된다. 한편 Fig. 8은 연천댐이 붕괴되기 전의 댐 유입량자료까지 비교하였는 바, 유출초기에는 심층유출량보다 적게 모의발생되었으나 댐 붕괴전의 수문곡선 상승부에서는 일치되는 결과를 보였다. 모의발생 첨두홍수량은  $12,470.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 총 유출량은  $797 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다.

### 3.3 유출 및 토양수분 변화의 시간적·공간적 출력

본 모형에 의한 출력결과로서 유역에서의 시간별 유출분포 및 강우초기와 종료시점에서의 토양수분의 변화를 발생시켰다. Fig. 9는 각각 강우개시후 3시간(a), 10시간(b), 30시간(c), 60시간(d)이 경과될 때의 유출 분포도를 보여주고 있다. 이 그림은 하천에서의 유출량과 지표면에서 발생된 유출량을 따로 생성시켜 합성

한 것이다. 그 이유는 하천유출량이 지표면유출량보다 훨씬 크기 때문에 지표면유출량을 시각적으로 구분하기 위함이다. 3시간, 10시간 경과시에는 포천관측소의 강우량이 적어 하천유출이 제대로 형성되지 않은 반면에 연천과 동송관측소의 강우는 하천유출에 기여하는 양상을 파악할 수 있었다. 30시간 경과시에는 전 유역에 걸쳐 지표유출과 하천유출이 발생됨을 알 수 있었다. 전반적으로 시간이 경과하면서 유역에서 지표면유출이 발생되면서 하천으로 도달되는 양상과 하천유출량이 증가하는 것을 시각적으로 파악할 수 있었다. Fig. 10은 유역에서 강우 전·후의 토양수분상태를 보여주고 있다. 강우전의 불포화 토양수분상태에서 강우 종료시에는 토양이 포화상태에 이르는 지역을 뚜렷하게 알 수 있었다.

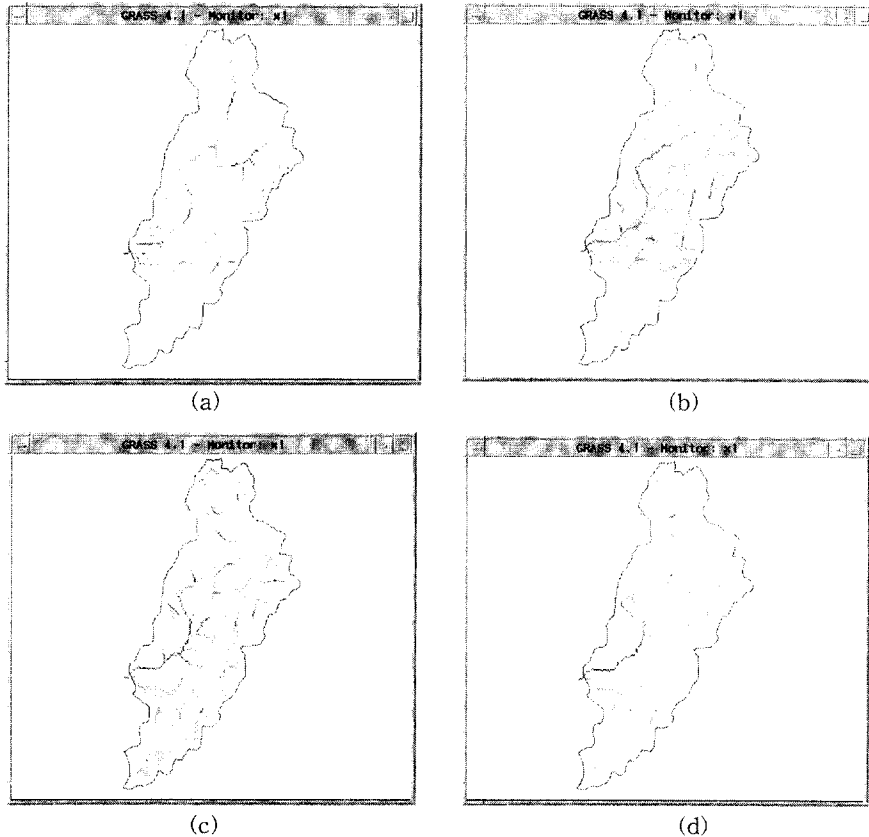


Fig. 9. Spatial Distribution of Surface and Channel Runoff after (a) 3 hrs, (b) 10 hrs, (c) 30hrs, (d) 60hrs of Storm Event (09/10/90~09/13/90, YeonCheon Dam Watershed)

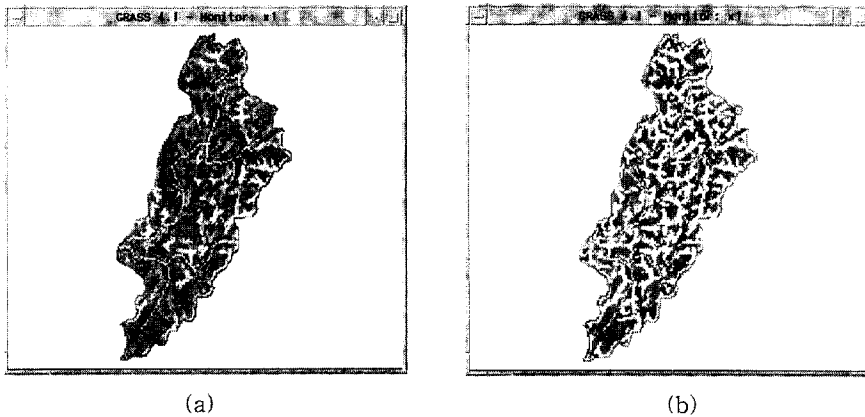


Fig. 10. Spatial Variation of Soil Moisture Content (a) Before and (b) After Storm event (09/10/90~09/13/90, YeonCheon Dam Watershed)

## 7. 요약 및 결론

개발된 모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 임진강유역의 일부인 연천댐 유역(1,875 km<sup>2</sup>)을 대상으로 모형에 필요한 자료(수치고도모형, 하천도, 흐름방향도, 토양도, 토지피복도, 티센망도)를 준비한 후, '90년 및 '96년도에 발생한 홍수사상을 대상으로 연천댐 지점에서의 댐 유입량과 모형에 의한 모의발생치를 비교하였는 바, 모형의 결과는 양호하였다. 출력결과로서 시간별 지표유출 분포도와 토양수분 분포도는 유역전반에서 발생하는 유출양상을 공간적으로 확인할 수 있었다. 흐름방향도는 모형의 중요한 입력자료로서, 본 연구에서는 GRASS의 r.watershed에서 drainage map과 accumulation map을 이용하여 와지 또는 역경사흐름을 보완한 흐름방향도를 생성시키는 알고리즘을 개발하였다.

## 참고 문헌

Bathurst, J.C. (1986). "Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen." *J. of Hydrology*, Vol. 87, pp. 79-102.

Bathurst, J.C. and O'Connell, P.E. (1992). "The future of distributed modelling: The Système Hydrologique Européen." *Hydrol. Process.*, Vol. 6, pp. 265-277.

Beven, K.J. (1987). *Towards a new paradigm in hydrology, in Water for the Future:*

*Hydrology in Perspective*. IAHS Pub. No. 164, pp. 393-403.

Beven, K.J. (1989a). "Changing ideas in hydrology: The case of physically-based models." *J. of Hydrology*, Vol. 105, pp. 157-172.

Beven, K.J. (1989b). "Interflow." *Unsaturated Flow in Hydrologic Modelling*, Edited by Morel-Seytoux, H.J., Porc. NATO ARW, Arles, France, Reidel, Dordrecht, pp. 191-219.

Beven, K.J. (1993). "Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling." *Advances in Water Resources*, Vol. 16, pp. 41-51.

Calver, A. (1988). "Calibration, sensitivity and validation of a physically-based rainfall-runoff model." *J. of Hydrology*, Vol. 103, pp. 103-115.

Grayson, R.B., Bloesch, G. and Moore, I.D. (1996). "Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data: THALES and TAPES-C." *Computer Models of Watershed Hydrology*. Edited by Singh, V.P., WRP, Colorado, pp. 669-696.

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.

<최종본 접수일 : 1998년 5월 7일>