

## 분포형 유출모형을 이용한 홍수에경보 시스템

조홍제\* · 임민수\*\* · 윤종춘\*\*\*

토목환경공학부

### <요 약>

본 연구에서는 격자 물수지 기법을 이용하여 기존의 분포형 유출모형인 TOPMODEL (Topograpy-based hydrological model)을 수정 보완하고, 실제의 강우현상을 표현하는 연속강우형 곡선인 무차원 삼각형 우량주상도로써 강우의 시간분포에 따른 유출모의를 통하여 홍수에경보 시스템 개발에 있어서의 방법을 제시하였다. 모형에 필요한 지형인자를 추출하기 위해서는 국립지리원에서 제작된 1:5,000 수치지도를 이용하여 대상유역인 사연댐 유역을 가로, 세로 50m 크기의 격자로 분할하여 각각의 격자가 가지고 있는 독립적인 입력자료들을 추출하였다. 또 개개의 격자마다 유출해석을 위한 수문정보를 입력하여 격자별 물수지를 계산하고 단방향 흐름경로 알고리즘에 의하여 지표흐름을 추적함으로써 유역의 전반적인 시간적·공간적 수문량을 파악하였다. 이 과정은 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)을 활용하였으며 GIS 도구 중의 하나인 ARC/INFO의 ARC와 TIN 그리고 GRID 모듈을 이용하여 모형의 실행에 필요한 입력자료를 추출하였고 ARC/INFO의 내장언어인 AML(Arc Macro Language)을 사용하여 모형의 실행 및 결과를 출력하였다.

## Flood Forecasting and Warning System Using a Distributed Runoff Model

Cho, Hong-Je · Lim, Min-Su · Yoon, Jong-Chun  
Department of Civil & Environmental Engineering

\* 울산대학교 토목환경공학부 교수  
\*\* 울산대학교 토목환경공학부 대학원  
\*\*\*울산대학교 토목환경공학부 대학원

## <Abstract>

The purpose of present study is to modify TOPMODEL(Topography-based hydrological model) of existing distributed runoff model by grid-based water balance method and present flood forecasting and warning system development method using a actual rainfall pattern from the dimensionless triangular distribution. The geographic data to simulate model used physiographic map scale 1:5,000 manufactured by the Geography government houses. The test area selected SayeonDam watershed and that was divided into horizontally and vertically size 50m raster cell. besides, as each grid cell had hydrologic data, the model calculated grid-based water balance and analyzed general spatially-temporally hydrologic information of watershed with a routing surface flow by single flow direction algorithms. The supported all grid data used ARC, TIN, GRID modules and AML(Arc Macro Language) of Arc/Info one of the GIS(Geographic Information system) tool.

## 1. 서 론

인류는 인접한 하천에 존재하는 수자원에서부터 많은 혜택을 받고 있으나 때로는 대홍수로 인하여 많은 인명과 재산의 피해를 입기도 한다. 이러한 피해를 감소 내지 방지하기 위해 홍수조절용 댐이나 제방, 홍수방벽(flood wall) 등의 축조 및 하천수개 등의 공학적 수단을 강구하게 된다. 따라서 홍수조절을 위한 공학적 방법의 수행절차에 대한 평가 및 홍수의 전파양상에 대한 예측방법 등은 경제적으로 대단히 중요성을 가진다.

세계기상기구(WMO, 1974)는 홍수예보를 “하천상의 대상지점에서 강우 또는 융설에 의하여 발생하는 홍수의 수위, 유량, 발생시각, 지속시간을 예보하는 것으로써 홍수가 발생하기 전에 하천흐름을 추정하는 것” 이라고 정의하였다.

홍수예보의 효과가 제대로 발휘하기 위해서는 정확성, 신속성, 예보 선행시간(lead time)을 갖추고 있어야 하는데 무엇보다도 예보 선행시간의 확보가 중요하므로 강우예측 부분이 필요하다. 홍수의 규모를 사전에 예측하였더라도 대책을 수립하고 조치하는 데는 시간이 필요하며, 따라서 예보 선행시간이 많이 확보되면 그 만큼 효과적으로 홍수를 방어할 수 있다. 홍수예경보에서 예보 선행시간은 강수예측 선행시간과 지표에 떨어진 빗물이 하도를 흘러 예측지점까지 흘러 오는 시간에 의해 결정된다. '97 중소하천 홍수예경보 시스템 기본계획조사 보고서'(한국 수자원공사, 1996)에서는 홍수는 3시간 이전에 예지되는 것이 바람직하다고 보고된 바 있다.

한편, 수문모형은 물의 순환과정 중 침투라든지 지표하유출(subsurface runoff) 혹은 지하수유출(groundwater runoff) 등의 과정변수(process parameter)의 공간적 변화를 무시하느냐 혹은 고려하느냐에 따라 집중형 모형(Lumped Model)과 분포형 모형(Distributed Model)로 분류한다. 집중형 모형은 유역을 동질의 배수역으로 보아 균등 강우조건하에 있다고 보며 과정변수의 공간적 변화가 없는 것으로 보는 모형으로써 보정단계가 필요하고 이를 위해서는 상당히 긴 기간의 수문자료가 필요하기 때문에 이렇게 구해진 매개변수들

은 지형, 토양의 종류 및 형태, 식생의 변화 등을 충분히 고려할 수 없는 제한점을 갖고 있다. 이에 반해 분포형 모형은 유역을 여러 개의 소유역으로 구분함으로써 유역특성인자 및 물리적으로 의미가 있는 수문과정변수의 공간적 변화를 고려하며 개개 소유역별로 모의한 후 유역전반에 걸쳐 합성함으로써 전유역의 수문학적 반응(hydrologic response)을 알고자 하는 방법이다.

국내외적으로 분포형 유출모형을 홍수예경보의 실무에 적용하는 경우는 아직 없으며, 분포형 유출 모형을 이용한 홍수예경보에 대한 직접적인 연구 및 시스템도 그리 많지 않다.

서병하 등(1985)은 홍수예경보 시스템을 효율적으로 운영하고 그 시스템을 자동화하기 위한 하천 유출의 수문학적인 예측방법의 개발에 대해서 연구한 바 있으며 이재형 등(1993, 1986)은 호우 발생 전의 기상상태, 유역의 저류상태 그리고 과거의 패턴을 반영한 실용성 있는 홍수예보 모형을 제안한 바 있으며 홍수예경보를 위한 강우예측방법에 대해서도 보고한 바 있다. 한건연 등(1995)은 도시하천에서의 홍수범람도 작성을 위한 2차원 모형을 개발한 바 있다. 한국건설기술연구원(1997)에서는 중소하천 홍수예경보 시스템을 위한 기본계획조사에 대해서 보고한 바 있다.

국외적으로는 Garrote와 Bras(1995b)는 DBSIM(Distributed Basin SIMulator)과 사용자 간의 의사소통을 담당하며 중간 결과를 제공하고 유역내 임의 지점의 수문곡선 도시, 모형 변수의 중간값 제공 등 다양한 기능을 갖추고 있는 실시간 대화형 유역유출 모의 시스템(RIBS, Real-time Interactive Basin Simulator)을 제시한 바 있다. Romanovicz 등(1993)은 영국 수문연구소의 물정보시스템(WIS, Water Information System)에서 분포형 유출모형인 TOPMODEL(Topography-based hydrological model)을 적용하였는데 유역면적이 8km<sup>2</sup>인 Severn유역의 토양수분 및 유출 상황을 예측하는데 이용한 바 있다. 한국수자원공사(1993)는 소양강댐의 유역(유역면적, 2,703km<sup>2</sup>)을 17개의 소유역으로 구분하고 지리정보시스템인 GRASS와 ARC/INFO를 이용하여 유출모형에 필요한 자료를 구한 바 있다.

본 연구는 기존의 분포형 모형 중의 하나인 TOPMODEL(Topography-based hydrological model)을 이용하여 중소하천유역에 대한 홍수예경보시스템 구축가능성 검토에 주안점을 두었으며, 강우사상의 모의는 무차원삼각형 우량주상도를 사용하였다.

모형에 필요한 지형인자를 추출하기 위해서 국립지리원에서 제작된 1:5,000 지형도를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 분할하여 각각의 격자가 가지고 있는 독립적인 입력자료들을 추출하였다. 이 과정은 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)을 활용하였으며 GIS 도구 중의 하나인 ARC/INFO의 ARC와 TIN 그리고 GRID 모듈을 이용하여 모형의 실행에 필요한 입력자료를 추출하였고 ARC/INFO의 내장언어인 AML(Arc Macro Language)을 사용하여 모형의 실행 및 결과를 출력하였다. 그림 1은 강우예측에 의한 분포형 유출모형의 구조를 보여 주고 있다.

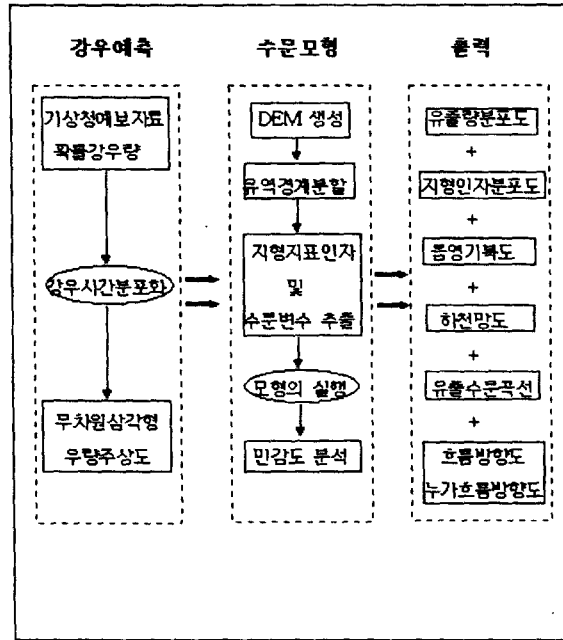


그림 1. 강우예측에 의한 분포형 유출모형의 구조

## 2. 강우예측모형

강우예측모형은 크게 수문통계학에 바탕을 둔 것과 수문기상학에 바탕을 둔 모형으로 대별된다. 전자는 확률·통계에 의한 방법으로 기존의 통계자료를 분석하여 강수를 유발하는데 관여하는 인자들을 추정하고 강수량과의 관계를 설정하는 연구가 뒷받침되어야 하고 주로 경험에 의존한 정성적인 성격이 강하다. 또 기상변동 자체를 수용할 수 없고 기상대의 예보에 따라 그 정확성이 좌우된다.

반면에 후자는 대기중의 일기 시스템의 형성과 변화를 지배하는 물리법칙을 발견하고 응용하는 것으로 주로 컴퓨터를 이용한 수치해석이 여기에 속하며 정량적인 예보가 가능하나 물리적인 변수해석이 어렵고 구성된 모형의 수치해석에 많은 시간을 요하는 단점이 있다. 여기에는 기기를 이용하는 방안과 모형에 의한 방법이 있다.

### 2.1 강우의 시간분포

홍수예경보를 위한 계획홍수량을 정확히 산정하기 위해서는 실제의 강우현상을 충실하게 표현하는 연속강우형 곡선인 강우의 시간 분포모형에 의한 설계강우의 문제가 선결되어야 한다. 강우가 발생하였을 경우 강우의 중심에서 가장 많은 비를 내리며 중심으로부터 멀어짐에 따라 강우의 강도는 점점 약화되는 것이 강우의 일반적인 현상이다. 강우강도 또한 강우가 지속하는 기간에 따라 강도의 크기가 변하여 강우강도와 면적, 강우강도와 지속

기간의 관계에 따른 일반적인 관계를 규명할 일정한 함수식을 찾기란 매우 어렵다. 따라서 통계 및 확률처리에 의하여 일반적인 경향을 찾고 있으며 발표되어진 연구들이 많은 유사성을 띄고 있다. 강우의 시간분포를 결정하는 대표적인 방법에는 삼각형 분포, 사다리꼴 분포, Huff, Pilgrim-Cordery에 의한 방법 등이 있으나 본 연구에서는 Yen과 Chow(1977, 1980)의 무차원 삼각형 분포를 선정하였다. 무차원 삼각형 분포는 다른 방법보다 매우 단순하여 분석하기가 쉽다. 따라서 시간도 절약될 것이다. 이것은 홍수예경보시스템의 예보 선행시간을 확보하는데 있어서 매우 중요한 요소이기도 하다. Yen과 Chow(1977, 1980)는 모멘트를 이용한 통계학적 분포기법으로 그림2와 같이 높이  $h^0 = 2$ , 밑변  $a^0 + b^0 = 1$ 인 무차원 삼각형 우량주상도로서 강우의 시간분포를 나타내는 방법을 제안하였다. 이로부터 호우의 시작점을 중심으로 한 우량주상도의 1차 모멘트  $M_1$ 은 다음 식 (2-1)과 같이 표현된다.

$$M_1 = \frac{\Delta t}{R} \sum_{j=1}^n (j-0.5)r_j \quad (2-1)$$

여기서,  $R$ 은 강우시점에서 종점까지 지속시간  $t_a$  동안의 총 강우량,  $r_j$ 는  $j$ 번째 시간 구간의 강우깊이,  $\Delta t$ 는 시간구간,  $n$ 은 호우의 시간구간 수이다. 강우의 시간분포를 수식화하기 위해 총강우량  $R$ 과 지속시간  $t_a$ 를 이용하여 우량주상도를 무차원화하면 무차원 강우깊이는  $r_j^0 = r_j/R$ , 무차원 지속시간은  $t_a^0 = 1$ 이다. 무차원 우량주상도의 1차 모멘트  $M_1^0$ 는  $M_1^0 = M_1/t_a$  로 표현된다. 변수 중에서 첨자 0가 없는 변수는 기하변수, 첨자 0가 있는 변수는 무차원 특성변수이다.

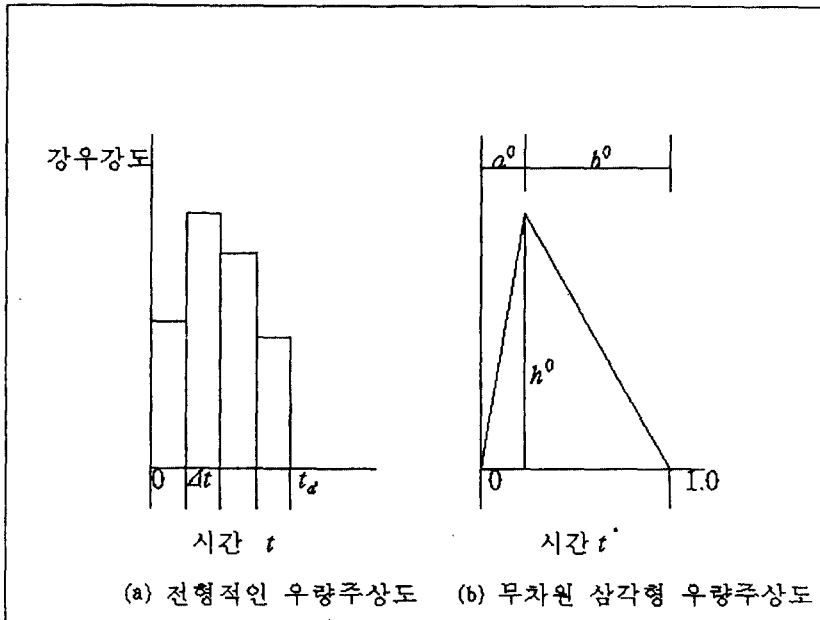


그림 2. Yen과 Chow의 무차원 삼각형 우량주상도 개념도

### 3. 수문모형의 기본이론

#### 3.1 모형의 개요

본 연구의 수문모형은 기존의 분포형 모형 중의 하나인 TOPMODEL 모형의 이론(Beven, 1984)을 부분적으로 도입하였다. 유역의 저류량(또는 저류부족량)과 지하수위(배수에 의한 저류 부족량)간에 가장 중요한 인자가 지형인자( $a/\tan\beta$ )와 어떤 관계가 있다는 것을 개념화한 모형으로 차단저류와 침투저류 및 포화층의 저류 등 3개의 저류량으로 구성되어 있으며 증발은 3개의 저류량 모두에서 소모되며, 차단저류를 초과한 경우는 유출기 여면적의 분포에 따라 지표유출의 형태로 나타나고 침투저류량과 포화저류량의 물은 회귀 흐름 및 기저유출의 형태를 통하여 하천흐름에 기여한다.

강우가 시작되면, 지수형 Green-Ampt 공식에 의한 침투와 return flow가 모의된다. return flow는 지표하 유출과 같은 기능을 하게 된다. 침투되고 남은 강우량은 먼저 뿌리 지역에서 필요한 초기 저류량 만큼 흡수하게 된다. 흡수가 초과(뿌리지역포화)되면 초과된 양 만큼 불포화지역(중력배수)으로 넘어가게 된다. 불포화지역에서 저류량은 지하수위에 기여를 하게 되는데 불포화지역 저류량이 지하수에서 필요한 저류량보다 크게 되면 불포화지역 저류량과 지하수에서 필요한 저류량 차이 만큼 초과되어 지표유출에 기여한다. 반면에, 불포화지역 저류량이 지하수에서 필요한 저류량보다 작게 되면(지하수에서 필요한 저류량을 만족시키지 않으면) 불포화지역에서 연직방향 흐름량 만큼 지하수에서 필요한 저류량을 채우게 된다.

각 시간단계에서의 총유출량은 3개의 저류량에서 발생한 지표유출과 기저유출 및 return flow를 운동과 추적을 이용한 격자별 물수지 방법에 의하여 유역출구 격자에서의 유출량을 산정하므로써 얻을수 있다. 그림 3은 본 연구의 수문모형인 TOPMODEL의 기본 구조를 나타내고 있다.

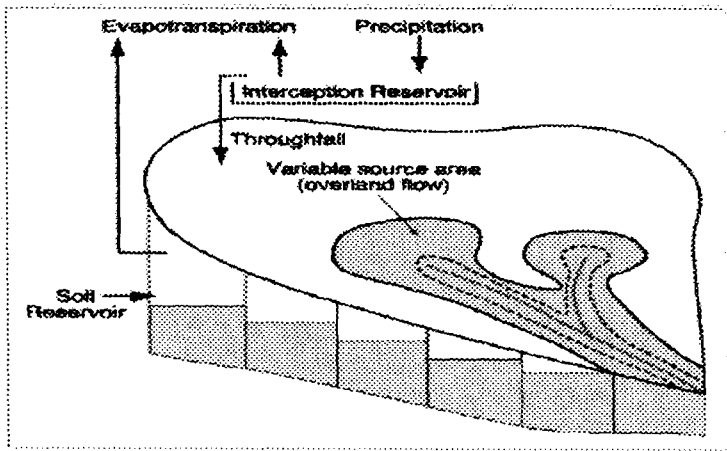


그림 3. 수문모형의 기본 구조

모형을 수행하기 위한 가정사항은 다음과 같다.

- ① 포화층의 거동은 연속적인 정상상태로 표시된다.
- ② 포화층의 동수경사는 지역의 지표지형경사 ( $\tan \beta$ )로 표시된다.
- ③ 깊이에 따른 하향경사의 투수량계수의 분포는 저류부족량이나 지하수위의 지수함수 식이다.
- ④ 지하수위로 유입되는 임의시간에서 공간적으로 균일한 충전량을 가진다.

### 3.2 지형지표 인자의 유도

유역의 지형에 대한 분석은  $a/\tan \beta$  분포 함수를 유도하기 위하여 필요하며  $a/\tan \beta$ 의 값을 얻기 위하여 그림 4와 같은 유역모형의 지형 자료를 분석하였다. 지형지표인자 ( $\ln(a/\tan \beta)$ )는 Quinn 등(1991)의 다중방향흐름 알고리즘을 이용하여 raster grid로부터 끌어내었다. 이것은 표고 grid를 3×3 격자망으로 생각하여 Cardinal 방향과 Diagonal 방향에 대해서 각각 경사도에 contour length를 가중하여 전 격자에 대해서 반복계산을 함으로써 구할 수 있다.

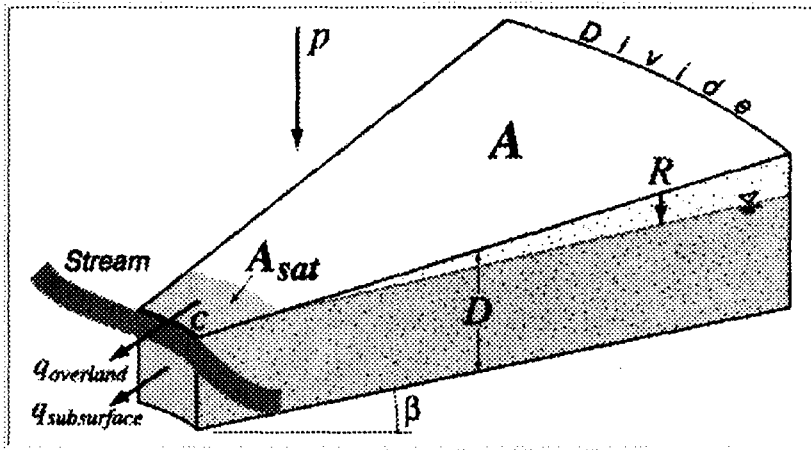


그림 4. 모형의 격자 구조

### 3.3 격자추적

유효 지하수 경사와 포화 흐름이 지역의 지표면 경사  $\tan \beta$ 와 평행하다는 가정2의 조건에 의해서 지표면 유출과 지표하 유출 및 지하수 유출을 운동과 기법을 적용하여 홍수추적을 하였다. 먼저 강우에 의하여 유출이 발생되면 해당 격자로 유입되는 양과 그 격자로부터 유출되는 양을 결정하기 위하여 격자의 흐름방향을 결정하였다. 격자의 흐름방향은 각 격자의 고도값을 이용하는데 일반적으로 3×3 격자망을 이용하여 주위의 격자 중에서 가장 낮은 고도값으로 흐르는 단일흐름방향(single\_flow direction)과 하나 이상의 격자로

배분되어 흐르는 복합흐름방향(multi\_flow direction)에 대한 알고리즘이 있다. 본 연구에서는 우리나라의 경우 지형경사가 비교적 급하고 지표면 수리학적 매개변수의 보정이 필요하므로 단일흐름방향을 채택하였다. 다음 그림 5는 3×3 격자상에서 중심격자가 가지는 방향값을 주위격자에 표시한 것이다. 예를 들어 중심격자의 값이 1이라면 중심격자는 1의 방향으로 흐르게 된다. 한편 격자의 유출방향은 단일흐름방향이지만 유입되는 격자는 하나 이상일 수가 있다. 따라서 중심격자로 유입되는 격자들은 다음 그림 6과 같이 3×3 격자망을 180° 회전시킨 상태에서 그 격자가 가지는 방향값을 이용하면 주위 격자에서 중심격자로 흘러 들어오는 격자들을 모두 계산할 수 있다. 임의 시간에 각 격자별로 계산된 유출량은 격자별 물수지 기법에 의해서 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음 시간으로 전달되어 각 격자의 변화를 추적하게 된다.

32	64	128	2	4	8
16		1	1		16
8	4	2	128	64	32

그림 5. 3×3  
격자망의 유출방향

그림 6. 3×3  
격자망의 유입방향

### 3.4 격자 물수지

물수지는 각 격자별로 계산되며, 임의 시간에 계산된 격자별 물수지 결과는 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음 시간으로 전달되어 각 격자의 변화를 추적하게 된다. 격자에서의 저류량과 토양수분 변화량은 각각 계산하게 된다.

#### 3.4.1 지표면 흐름

각 격자에서 차단, 침투, 포화층 저류 및 증발량에 의해서 손실되고 남은 양이 식 (3-1)과 같이 지표면 유출에 기여하는 것으로 하였다.

$$\frac{dS_i}{dt} = P(t)_i - CUMF(t)_i - SRZ(t)_i - SUZ(t)_i + \sum Q_{sur,유입,i} - Q_{sur,유출,i} - AE(t)_i \quad (3-1)$$

여기서,  $i$  = 격자주소,  $S_i$  = 격자저류량( $m^3$ ),  $P_i$  = 강우량( $m^3/s$ ),  $CUMF_i$  = 침투량( $m^3/s$ ),  $SRZ$  = 뿌리지역 저류량( $m^3/s$ ),  $SUZ$  = 불포화지역 저류량( $m^3/s$ ),  $Q_{sur,유입,i}$  = 주위 격자로부터의 지표면 유입량( $m^3/s$ ),  $Q_{sur,유출,i}$  = 계산격자에서의 지표면 유출량( $m^3/s$ )  $AE$  = 실제증발산량( $m^3/s$ ) 이다.



### 3.4.2 하천흐름

해당격자가 하천인 경우는 식 (3-2)와 같이 주위격자로부터의 return flow(지표하 유출량)가 하천격자로 유입되는 것으로 하였다.

$$\frac{dS_i}{dt} = P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{sur.유입,i} + \sum R(t)_{유입,i} - Q_{sur.유출,i} \quad (3-2)$$

### 3.4.3 토양수분변화

강우 발생시 각 격자별 토양속의 수분량이 불포화 되어있다면 식 (3-3)와 같이 차단, 침투, 포화층저류 등을 통해서 토양이 함유할 수 있는 수분량으로 하였다.

$$\frac{dSM_i}{dt} = SRZ(t)_i + CUMF(t)_i + SUZ(t)_i + SRZ + \sum R(t)_{유입,i} - R(t)_{유출,i} - QB(t)_i - AE(t)_i \quad (3-3)$$

여기서,  $SM_i$  = 격자 토양수분(m<sup>3</sup>),  $R_{유입,i}$  = 주위격자로부터의 return inflow(m<sup>3</sup>/s),  $R_{유출,i}$  = 계산격자에서의 return outflow(m<sup>3</sup>/s),  $QB$  = 지하수유출량(m<sup>3</sup>/s) 이다.

## 4. 모형의 입력자료 구성

본 연구의 수문모형은 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)을 도입하여 수치고도모형을 이용하여 필요한 수문변수들을 추출하였고 GIS 도구인 ARC/INFO를 사용하여 흐름방향도, 누가흐름방향도, 음영기복도, 하천망도, 유역경계도 및 지형지표인자 분포도 등을 자동생성 하였다. 모형의 매개변수는 민감도 분석을 하여 최적치를 사용하였다. 강우-유출자료는 기존의 성과와 비교 검토하기 위하여 '96 울산권 광역상수도 사업을 위한 타당성조사 및 기본계획 보고서'를 참조하였다.

### 4.1 대상유역 선정

본 연구에서는 개발된 모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 유역면적이 124.5km<sup>2</sup>, 년평균 강수량이 1,273.0(mm), 그리고 년평균유출량은 89.86×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 정도인 울산지역의 주요 상수공급원인 사연댐 유역을 대상으로 모형을 적용하였다.

울산지역은 공업화에 따른 기상변화에 의해 최근에는 전국에서 가장 무더운 지역 중의 하나로 인식되고 있으며, 집중호우 등 기상의 이상변화 가능성이 가장 큰 지역이다. 그 가운데에서도 사연댐 유역은 산지지역이 많이 차지하고 있기 때문에 경사가 매우 급하여 유속이 비교적 큰 지역이다.

## 4.2 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)

수치고도모형은 국립지리원에서 제작한 1:5,000 지형도를 이용하여 Arc/Info의 GRID 모듈을 이용하여 자동생성 하였다. 격자간격은 작을수록 좀 더 정확한 분포형 모형이 되지만 본 연구에서는 계산시간과 시스템용량 문제 등으로 인하여 격자간격을 50m로 하였다. 그림 7은 사연댐 유역경계로 reclass하여 clipping한 DEM을 보여주고 있다.

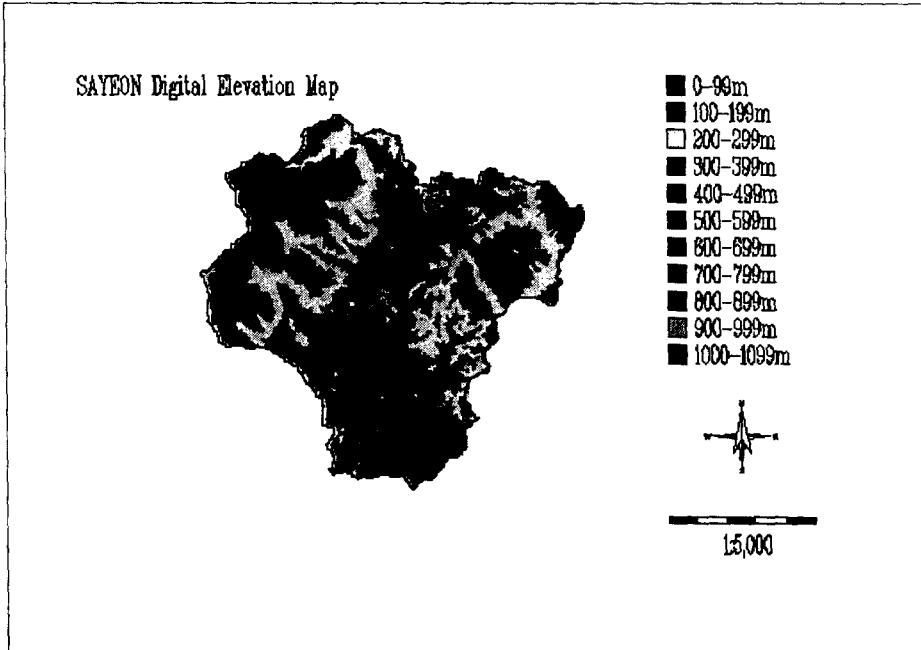


그림 7. Digital Elevation Map

## 4.3 흐름방향도(Flow Direction Map)

그림 5와 그림 6에서와 같은 3×3 격자망에서 중앙 격자를 중심으로 한 각 방향 격자에 고유의 번호를 부여한 후, 8개 격자의 고도값을 비교하여 가장 낮은 방향을 나타내는 격자의 번호를 중앙 격자의 흐름방향으로 저장한다. 이와 같은 작업을 대상 수치고도 행렬의 처음부터 끝까지 이동하면서 반복 작업을 하게 된다. 흐름방향도는 GRID 모듈내의 flowdirection 명령어를 이용하여 쉽게 생성시킬수 있다. 만약 격자값이 -1의 값을 가지면 그 격자는 와지(sink)를 나타내는데, 이를 제거하기 위하여 fill 이라는 명령어를 사용하였다. 와지를 제거시킨 뒤 흐름방향도가 제대로 생성되었는지 확인하기 위하여 사연댐 유역의 하천망도를 출력하였는 바, 하천이 잘 연결된 것을 알 수 있었다. 그림 8은 사연댐 유역의 흐름방향도이다.

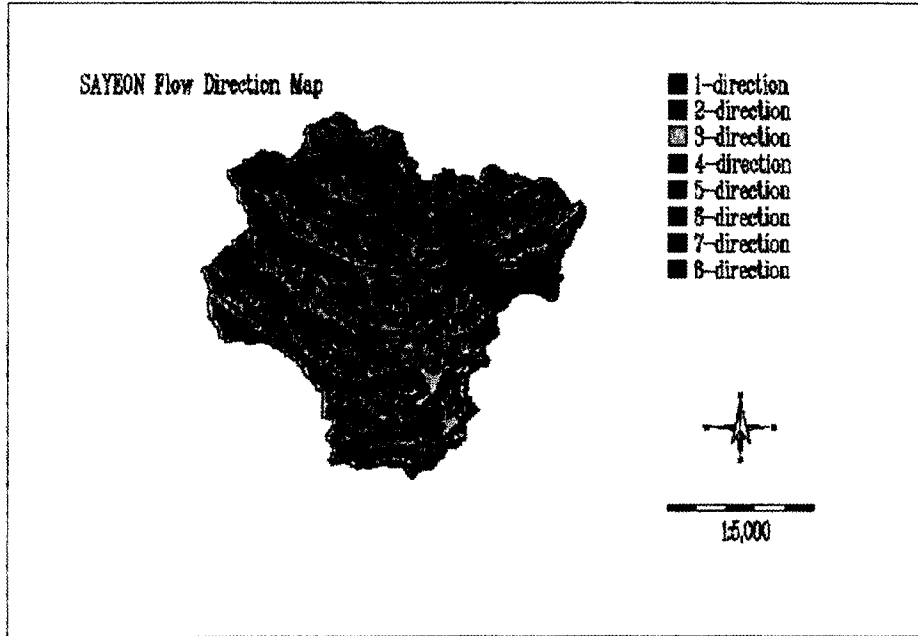


그림 8. Flow Direction Map

#### 4.4 누가흐름방향도(Flow Accumulation Map)

누가흐름도는 흐름방향도에서 유출격자를 받아들이는 입장에서 역으로 생각하여 구할 수 있다. 그림 5, 그림 6과 같은 3×3 격자망에서 중앙 격자를 중심으로 유입되는 주위 격자의 개수를 더하여 중앙 격자에 총 유입격자의 수를 저장한다. 이와 같은 작업을 대상 수치고도 행렬의 처음부터 끝까지 이동하면서 반복 작업한다. 누가흐름방향도는 flowaccumulation 명령어를 이용하여 자동생성 시킬 수 있다. 그림 9는 누가흐름방향도를 보여주고 있다.

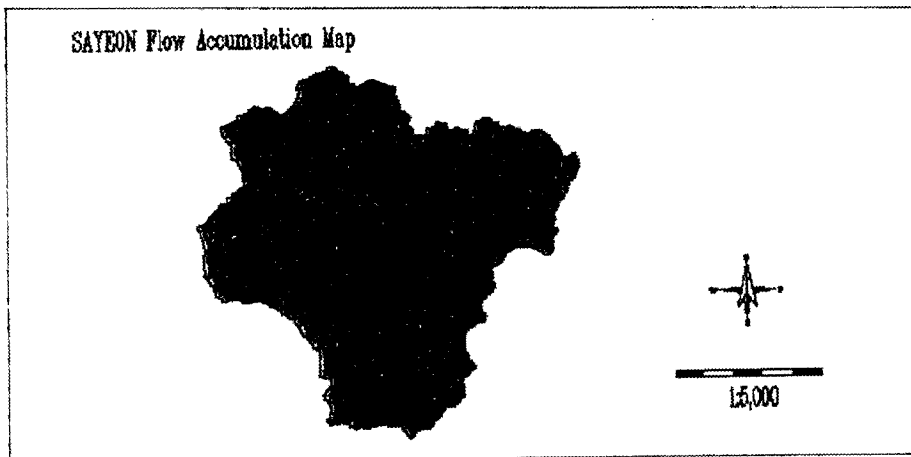


그림 9. Flow Accumulation Map

#### 4.5 지형지표인자( $\ln(a/\tan\beta)$ ) 분포도

모형의 입력자료로 사용되는 지형지표인자(  $\ln(a/\tan\beta)$  )는 Quinn 등(1991)의 다중방향 흐름 알고리즘을 이용하여 경사도, 지형자료 등을 참고 분석하여 raster grid로부터 끌어내었다. 지형지표인자의 크기는 격자의 포화에 따른 유출기여면적에 영향을 주게 된다. 따라서 주로 하천에 근접한 격자가 지형지표인자가 큼을 알 수 있었다. 그림 10은 지형지표인자 분포도를 표시하고 있다.

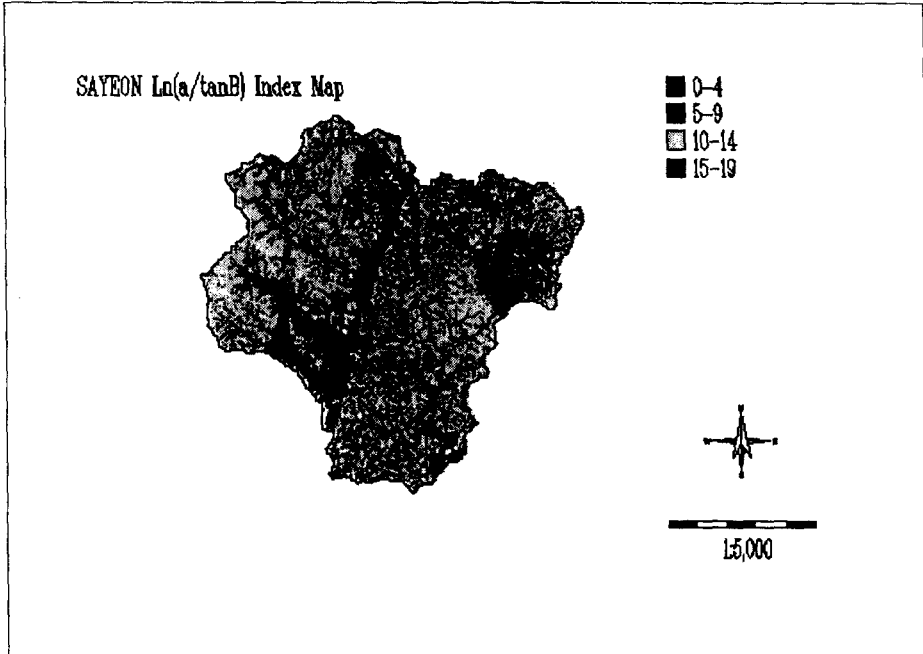


그림 10. 지형지표인자(  $\ln(a/\tan\beta)$  ) 분포도

#### 4.6 모형의 강우-유출자료 및 적용 매개변수

사연댐 유역에 대한 모형의 적용을 위한 대상강우는 '96 울산권 광역상수도 사업을 위한 타당성조사 및 기본계획 보고서'를 이용하여 1990년 6월 24일 0시~1990년 6월 26일 24시 동안의 강우량을 선정하였다. 무차원 삼각형 우량주상도는 연속 강우사상인 1990년 6월 24일 18시~1990년 6월 25일 24시까지의 자료를 이용하였다. 기존의 우량주상도에 의한 유출과 무차원 삼각형 우량주상도에 의한 유출을 비교 검토하기 위해서 댐지점에서의 실측유입량 자료를 이용하여 모형의 매개변수들을 결정하고 결과를 비교 검토하였다.

Manning의 조도계수는 THALES 모형(Grayson 등, 1996)에서 Coweeta 유역(17km<sup>2</sup>) 적용시에 사면에서 0.1~0.4범위로 제시한 바 있어 이를 참고하였고, 하천흐름인 경우는 조홍제 등(1997)의 "도시하천 고수부지내의 식생에 의한 홍수위변화 해석"에서 수목군 지역은 0.3, 저수로 부분은 0.026, 그리고 수목군을 제외한 고수부지는 0.03~0.06 정도로 검토된 바 있

어 이를 인용하였다. 따라서 본 연구에서는 지표흐름인 경우는 0.40, 하천흐름인 경우는 0.06으로 선택하였다. 실측된 자료를 이용하여 산정된 모형의 매개변수들을 토대로 사연댐 유역에서의 또 다른 강우사상에 대해서도 적용할 수 있다.

표 1. 모형의 매개변수

parameter (변수명, 단위)	value	parameter (변수명, 단위)	value
물리적 의미의 매개변수 (m)	0.05	습윤전선을 가로지르는 함수비 변화 (dth)	0.2
횡방향 포화투수계수 (t0, m <sup>2</sup> /h)	4.0	지표면 수리학적 전도율 (xk0)	2.0
뿌리지역 초기 저류부족량 (sr0, m)	0.002	습윤전선 흡입량 (hf, m)	0.03
불포화지역 초기 저류부족량 (suz0, m)	0.0	불포화지역에서 단위저류부족량당 지체시간 (td, hr)	30
초기하천유량 (q0, m)	0.00515	뿌리지역에서 이용할 수 있는 water capacity (srmax, m)	0.05

## 5. 모형의 적용

### 5.1 적용예 I

본 연구를 위하여 개발된 수문모형이 제대로 수행을 하고 유출모의가 양호한지 확인하기 위하여 먼저 '96 울산권 광역상수도 사업을 위한 타당성조사 및 기본계획 보고서'를 바탕으로 1990년 6월 24일 0시~1990년 6월 26일 24시 동안의 강우량 자료를 적용하여 유출모의를 실시하였다. 사연댐 지점에서의 댐 유입량자료와 댐지점 격차에서 모의 발생된 유출량을 비교하면 그림 16과 같다. 그림 16은 실측 및 모형에 의한 유출수문곡선을 나타내며, 강우초기시에는 모의된 유출량이 실측치에 비해 많은 유출이 생기나 시간이 지나감에 따라 유출이 감소하는 것을 나타낸다.

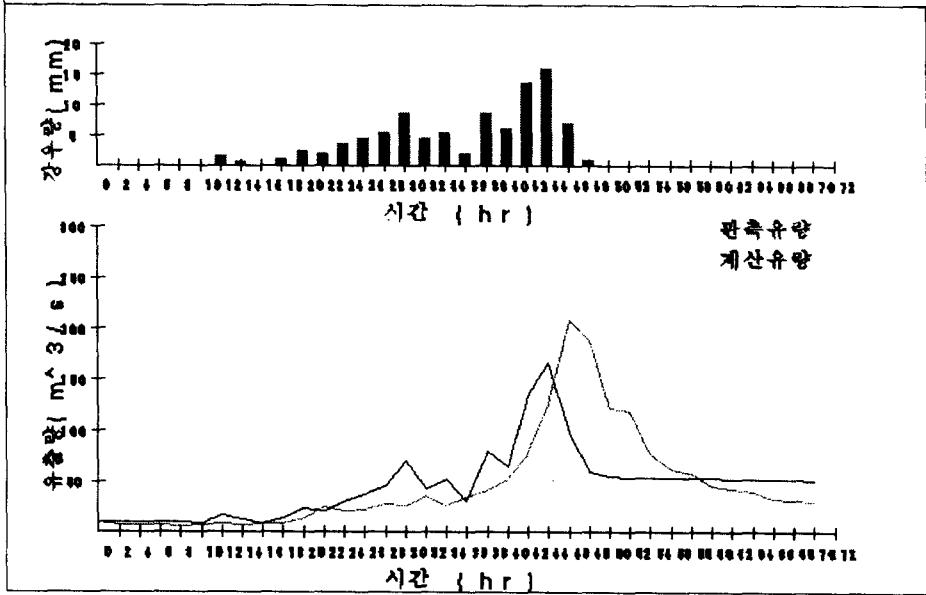


그림 11. 관측-계산 유출량 비교 (1990/6/24~1990/6/26)

적용결과에 의하면, 실측 및 모의 발생된 침투유량은 각각 209m<sup>3</sup>/s, 166m<sup>3</sup>/s 으로 모의된 양이 작게 나타났으며 침투시간은 약 2시간 정도 모형에 의한 값이 빠르게 나타났으나 거의 일치하였다. 침투시간 이후의 감수곡선은 실측된 양은 비교적 일정하게 감소하는데 반해서 모형에 의한 모의 발생량은 침투홍수량에서 급격하게 감소한 뒤 아주 작은 양으로 일정하게 감소됨을 알 수 있었다. 그 이유는 본 연구의 모형이 침투를 많이 고려하는 모형인데서 기인한 것으로 판단하였다.

### 5.2 적용예 II

강우의 시간분포를 고려한 무차원 삼각형 우량주상도와 전형적인 우량주상도에 의한 유출모의 결과를 비교 검토하였다. 강우량 자료로는 무강우가 전혀 없는 연속 강우사상을 선별하기 위하여 '96 울산권 광역상수도 사업을 위한 타당성조사 및 기본계획 보고서'에서 1990년 6월 24일 18시~1990년 6월 25일 24시까지의 자료를 선택하였다. 모형의 검정을 위해서 매개변수들은 적용예 I 에서의 매개변수들을 사용하여 적용하였다. 모형의 계산시간은 1시간 간격으로 수행했으며 Yen-Chow의 1차 모멘트 방법에 의하여 삼각형 우량주상도를 구성하였다. 그림 17은 일반적인 우량주상도와 삼각형 우량주상도에 의한 각각의 유출수문곡선을 비교하고 있다.

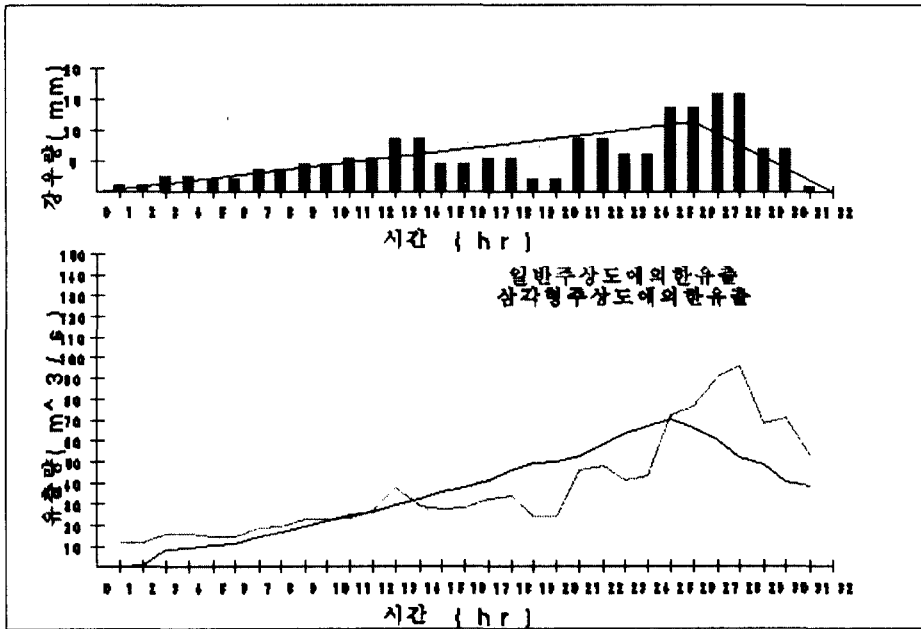


그림 12. 일반-삼각형 주상도에 따른 유출량 비교(1990/6/24~1990/6/26)

일반 우량주상도 및 삼각형 우량주상도를 비교해 보면 일반우량주상도의 최대강우강도는 15.80mm/hr인데 반해 삼각형우량주상도의 최대강우강도는 11.38mm/hr 정도로 나타났다. 두 우량주상도에 대한 유출수문곡선의 첨두유량과 첨두시간은 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 실제의 강우현상을 표현하기 위해서 사용한 무차원 삼각형 우량주상도에 의한 유출모의를 적용해도 약간의 차이는 있지만 비교적 유사한 패턴으로 모의하므로 사용하여도 무방하고 좀 더 합리적이라고 판단하였다.

### 5.3 적용예 III

본 연구의 모형이 비교적 큰 호우사상에 대해서는 어떤 양상을 나타내는지 알기 위하여 적용예 I, II보다는 큰 강우자료를 적용시켜 보았다. 대상강우로는 기존의 성과 보고서인 '96 울산권 광역상수도 사업을 위한 타당성조사 및 기본계획 보고서'에서 1991년 8월 22일~1991년 8월 24일 동안의 강우자료를 활용하였다. 또 무차원 삼각형 우량주상도의 구성을 위하여 위 자료에서 무강우가 전혀 없는 구간의 강우사상을 선별하였다. 유출모형에 사용할 매개변수들은 모형의 검정을 위해서 적용예 I, II에서의 변수들을 그대로 사용하였다. 그림 18은 관측유출량과 일반주상도와 삼각형 주상도에 따른 유출량 비교를 나타내고 있다.

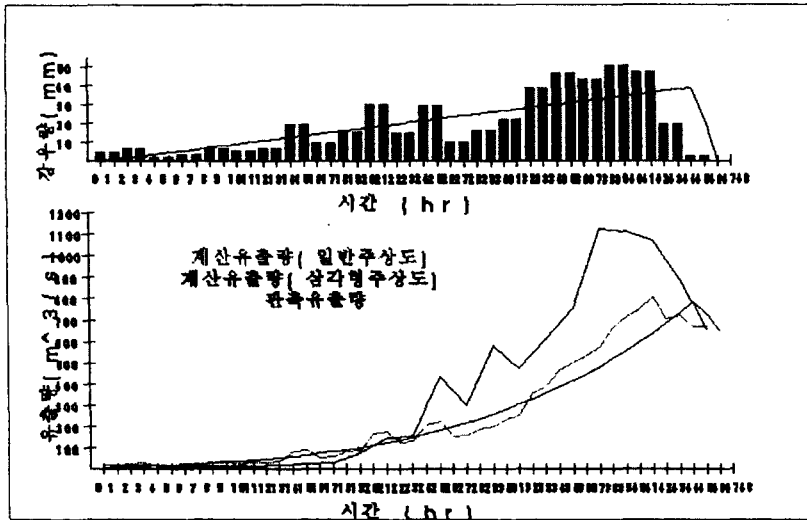


그림 13. 관측-일반-삼각형 주상도에 따른 유출량 비교(1991/8/22~1991/8/24)

적용결과를 요약하면, 그림 18과 같이 일반주상도와 삼각형 주상도에 따른 유출량은 관측된 유출량과는 침투유량과 침투시간에 있어서 약간의 차이를 나타내고 있으나 두 주상도에 의한 유출량은 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 비교적 큰 호우가 발생했을 경우에도 실제 강우현상을 반영하기 위해서 사용한 무차원 삼각형 우량주상도로써 홍수량 예측이 가능하다고 판단하였다. 이것은 본 연구의 목적인 강우예측 및 강우의 시간분포를 통한 홍수예경보 시스템에 있어서 중요한 예측홍수량 산정에 부합된다고 생각된다. 그림 19는 1991년 8월 22일~1991년 8월 24일 동안에 발생한 호우에 대해서 사연댐 격자에서 계산된 유출량과 관측된 댐유입량을 비교하고 있다. 유출양상, 침투시간, 침투유량 등이 거의 일치함을 알 수 있었다.

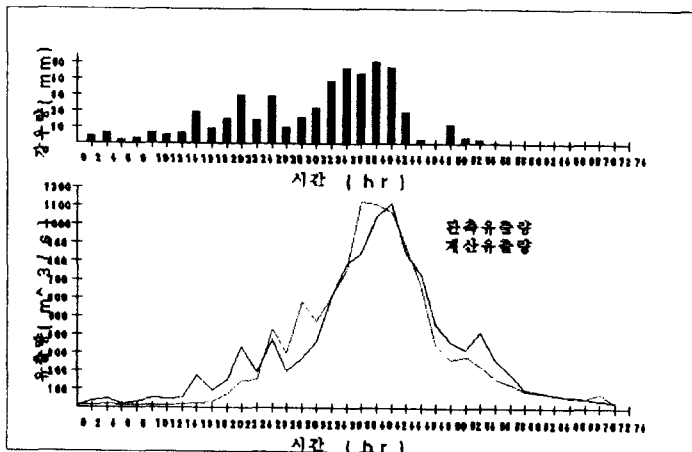


그림 14. 관측-계산 유출량 비교(1991/8/22~1991/8/24)



## 6. 결 론

격자 물수지 기법을 이용하여 기존의 분포형 강우-유출모형을 수정 보완하였다. 본 모형은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 개개의 격자마다 유출해석을 위한 수문정보를 입력하여 격자별 물수지를 계산하고 단방향 흐름경로 알고리즘에 의하여 지표에서 흐름을 추적함으로써 유역의 전반적인 시간적·공간적 수문량을 파악하도록 하는 모형이다.

개발된 모형의 적용가능성을 검토하기 위하여 사연댐 유역을 대상으로 모형에 필요한 자료를 준비한 후, '90년도, '91년도에 발생한 강우사상을 대상으로 사연댐 지점에서의 댐 유입량과 모형에 의한 모의 발생치를 비교하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모형에 의한 침투시간은 실측치에 가깝게 비교적 양호하게 잘 모의하였다.
- (2) 침투홍수량은 모형에 의한 발생치가 실측치보다 작게 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 일반우량주상도와 무차원 삼각형 우량주상도에 의한 유출모의 비교에서는 호우크기가 비교적 큰 호우사상과 작은 호우사상에 대해서 모두 침투시간, 유출양상, 침투유량 등이 거의 일치함을 알 수 있었다.
- (4) 실제의 강우현상을 재현하기 위해 사용한 삼각형 우량주상도에 의한 강우-유출모의 결과가 실측강우에 의한 유출과 비교적 잘 일치하므로 홍수예경보 등을 위한 유출모의를 위한 삼각형 우량주상도를 사용하는 것도 합리적인 방법이라고 판단되었다.
- (5) 본 연구의 수문모형은 침투홍수량을 실측치에 비해 비교적 작게 산출하는 경향이 있고 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있으나 모형의 매개변수 추정방법 등을 수정 보완한다면 장기유출모의와 홍수예경보 시스템의 실무에 적용이 가능하다고 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 1997년도 울산대학교 대학원 특별지원 과제연구비에 의해 수행되었으며, 당국에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김현준 (1995). "강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의 개발". 한국건설기술연구원 연구보고서. 95-WR-1101-1.
2. 김상현 등(1996). "지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정". 한국수자원학회지 논문. 제29권 제 4호. pp.199-208.
3. 김성준 (1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I), 이론 및 모형". 한국수자원학회논문집. 제31권. 제 3호. pp.303-308.
4. 김성준 등(1998). "격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(II), 적용예(연천댐 유역을 대상으로)". 한국수자원학회논문집. 제31권. 제 3호. pp.309-315.
5. 한국수자원공사 (1996). "울산권 광역상수도 사업 타당성조사 및 기본계획보고서 부록". pp.723,736
6. 조홍제 등(1997). "TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구". 한국수자원학회. 제30호 제5호. pp.515-526.
7. 조홍제 등(1997). "도시하천 고수부지내의 식생에 의한 홍수위변화 해석". 대한토목학회 논문집. 제17권 제II-4호. pp.309-318.
8. 서병하 등(1996). "강우의 시간 분포모형 산정에 의한 강우-유출 해석". 한국수자원학회논문집. 제29권 제6호 pp.189-201.
9. 한국건설기술연구원 (1997). "중소하천 홍수예경보 시스템 기본계획조사 보고서 및 부록".
10. 한국수자원공사 (1996). "울산권 광역상수도 사업을 위한 타당성조사 및 기본계획 보고서 부록". pp.722-723.
11. Beven, K J, Kirkby, M J, Schoffield, N, and Tagg, A. 1984 Testing a Physically-based Flood Forecasting Model(TOPMODEL) for Three UK Catchments, J. Hydrol. 69; 119-143.
12. Wolock, D M, and McCabe, G J, 1995, Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, Water Resources Research, vol 31, 5; pp.1315-1324.
13. Borga, M and Di Luzio, M, 1992, Sensitivity of a semidistributed hydrologic model to rainfall estimation accuracy, in A J Saul (Ed.) Floods and Flood Management, Kluwer 1992, 157-168.
14. Blazkova, S. & Beven, K. J. 1995 Frequency version of TOPMODEL as a tool for assessing the impact of climate variability on flow sources and flood peaks. Journal of Hydrology and Hydromech, 43(6), 392-411.
15. Blazkova, S. and K.J. Beven, 1997. Flood Frequency Prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL, J. Hydrol., 195, 256-278.
16. Vijay P. Singh. Computer Models of Watershed Hydrology. Louisiana State University.
17. Vijay P. Singh. Kinematic Wave Modeling in Water Resources. Surface-Water Hydrology.

18. Joseph L. Jones, Tana L. Haluska, Alex K. Williamson, and Martha L. Erwin. 1997. Updating Flood Inundation Maps Efficiently: Building on Existing Hydraulic Information and Modern Elevation Data with a GIS. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-200.
19. Henrik G. Muller, Morten Rungoe. Integrating Floodplain Management and Numerical Modelling using ARCVIEW. Danish Hydraulic Inc. Agern Alle 5, DK-2970 Horsholm.
20. Cabral, M. C., Bras, R. L., Tarboton, D. and Entekhabi, D. 1990. A distributed, physically-based rainfall-runoff model incorporating topography for real-time flood forecasting. Ralph M. parsons Lab., P대. No.332, MIT Dept. of Civil Eng., Cambridge, MA.
21. Georgakakos, K. P. and M. D. Hudlow., Quantitative precipitation forecast techniques for use in hydrologic forecasting. Bull. Am. Meteorol. Soc., vol.65 No.11,1984 pp.1186-1200.