

## GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우

### - 유출 모형의 개발 (I)

### - 이론 및 모형의 개발 -

## Development of Distributed Rainfall-Runoff Model by Using GIS and Uncertainty Analysis (I)

### - Theory and Development of Model -

최 현 상\* / 한 건 연\*\*

Choi, Hyun Sang / Han, Kun Yeun

#### Abstract

The main objective of this study is to develop a GIS-based two-dimensional model for the simulation of rainfall-runoff process and overland flow of a watershed. The tasks of this study are summarized: to develop a two-dimensional model for overland flow and to construct a rainfall-runoff simulation system linked with GIS.

The mathematical formulation of the model incorporates four parts: spatially varied rainfall, spatially distributed infiltration, 1-directional, 4-directional and 8-directional overland flow routing scheme, and one-dimensional channel routing scheme. For the development of stochastic model, Monte Carlo simulation method has been directly integrated into the model.

GIS using Arc/Info and ArcView has been applied to prepare the model input data(elevation, soil type, rainfall data, etc.) for a simulation and to demonstrate the simulation results.

**Keywords** : Distributed Model, GIS, Rainfall-Runoff, Uncertainty Analysis

#### 요 지

본 연구의 목적은 유역에서의 강우-유출 과정 모의를 위해 GIS에 기반을 둔 2차원 강우-유출 해석모형의 개발이다. 본 연구가 추구하는 세부 목표는 첫째, 강우-유출해석을 위한 2차원 모형을 개발하고, 둘째, 개발된 모형과 GIS를 연계하는 것이다.

모형에 포함된 수식화 과정은 다음의 네 가지로 요약할 수 있다. 시·공간적으로 분포하는 강우의 처리과정과 침투과정, 유역의 유출을 추적하기 위한 1, 4, 8방향 흐름 추적과정, 그리고 하도 추적을 위한 1차원 해석과정이다. 개발된 모형에 Monte Carlo 모의기법을 결합하여 추계학적 모형을 구성하였다. 모형에 필요한 입력자료(고도, 토양도, 강우자료 등)의 구축과 모의결과의 도시를 위해 Arc/Info와 ArcView를 연계·활용한 시스템을 구성하였다.

**핵심용어** : 분포형모형, 지리정보시스템, 강우-유출, 불확실도

\* 한국건설기술연구원 선임연구원  
Senior Researcher, Korean Institute of Construction Technology, Koyang, Kyunggi 411-712, Korea  
(E-mail : hyunsang@kict.re.kr)

\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수  
Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea  
(E mail : kshanj@knu.ac.kr)

## 1. 서론

최근 들어 전세계적으로 극심한 기후변화와 그에 따른 기상이변으로 집중호우에 의한 피해가 급증하고 있으며, 기상재해에 따른 강우-유출 현상에 관한 정교한 해석이 필요하게 되었다. 국내의 경우에도 1990년 중반부터 매년 국지적 집중호우나 이상호우로 인한 피해가 반복되고 있고, 이러한 문제점을 해결하기 위해 물리적 거동에 기초한 새로운 강우-유출 모형의 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 또한, 과거에는 거의 불가능했던 실제 지형정보들이 인공위성 기술, 컴퓨터 기술과 GIS 관련 기술의 급속한 발전, 영상정보 해석기술의 발전 등에 힘입어 그 적용가능성을 확대시키고 있다. 국내의 경우에도 1990년대 중반부터 국가적으로 추진된 국가수치기본도 사업을 필두로 국내의 지형정보들이 지속적으로 확충되고 있으나 이를 적극적으로 활용하기 위한 연구들은 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 그동안 국내에서 이루어져 왔던 집중형 강우-유출모형이나 단순화된 분포형 모형이 아닌 2차원 분포형 강우-유출 모형을 제시하였다. 이를 위해 우선 강우의 시간적, 공간적 변화를 모의할 수 있는 기법을 도입하고, 공간적으로 상이하게 나타나는 토양특성에 대한 침투과정을 모의하고 초과 강우량을 산정하기 위해 Green-Ampt 공식을 도입하였다. 초과강우량의 지표류 유출을 모의하기 위해 지표면 유출에 대한 2차원 확산과 방정식을 도입하여 해석하고, 하도에 대한 1차원 확산과 방정식을 도입하였다. 지표류 유출모의에 있어서 흐름방향의 다양성을 고려하기 위하여 1방향, 4방향, 8방향 흐름에 대한 흐름추적이 가능하도록 구성하여 흐름방향에 따른 차이에 대해서도 비교·검토하였다. 확장론적 해석과 더불어 입력자료의 오류나 변동성을 고려한 체계학적 해석기법을 도입하기 위해 본 모형에는 Monte Carlo 모의기법을 적용하였다. 또한, GIS와의 연계를 통해 모의수행에 필요한 수치자료 처리 및 결과 출력을 위해 ArcView와 연계하였다.

1990년대에 들어서면서 인공위성자료나 레이더 자료의 활용성이 높아지면서 분포형 강우-유출 모형에 관한 연구들이 서서히 증가하게 되었고, 최근에는 컴퓨터 성능의 급격한 발달과 수치해석 기법의 발달로 많은 발전을 이룩하였다. 유역에 관한 대표적인 분포형 모형으로는 Beven과 Kirkby(1979)가 제안한 TOPMODEL(Topography MODEL)과 Julien과 Saghafian(1991) 등이 제안한 분포형 강우-유출모형, Abbott 등(1986)이 제안한 SHE(Systeme Hydrologique Europeen) 모형 등이 있다. 국내의 연구 가운데 분포형 강우-유출에 관한 연

구로는 김상현(1997)이 인공배수유역에서의 TOPMODEL을 적용시켜 유출과정을 배수관을 통한 유출, 지하수 유출, 지표수 유출 등으로 나누어 수문학적 거동을 추적하였으며, 조홍제 등(1997)은 강우-유출해석에 GIS와 TOPMODEL을 이용하여 모형변수의 민감도 분석과 지형의 격자별 크기에 따른 침투 유량과 발생시각의 변화에 대한 연구를 수행하였으며, 배덕효 등(2000)은 단일 유역에서 TOPMODEL의 홍수예보능에 관한 연구를 수행한 바 있다.

Maidment(1993)에 의하면, GIS와 수문학적 모형을 결합함으로써 보다 신속하고 효과적으로 모의수행할 수 있는 방법을 제공할 수 있고, 이전에는 접근할 수 없었던 영역에 대한 연구가 가능하게 될 것이라고 밝히고 있다. 이미 수문모형들과 GIS와의 연계 가능성을 파악하기 위한 많은 연구들이 이루어졌다. Gao 등(1993)은 분포형 강우-유출 모형과 GIS를 연계하여 유역내에서의 수문학적 반응(토양 함수량의 재분포, 유출의 생성, 흐름의 변동)을 실시간으로 나타내기 위해 GIS를 이용하였다. 또, Charirat와 Delleur(1993)는 실세계 현상에 기초한 수문모형인 TOPMODEL과 GIS를 접목시켜 GIS가 가지는 자료관리와 자료수정 능력을 이용하여 관련된 매개변수를 유도하였다. 이들은 수치고도모형(DEM)의 정확도와 수문모형 결과의 정확도 사이에서 균형을 도모하였다.

## 2. 이론적 배경

본 장에서는 시간적, 공간적으로 변화하는 강우에 대한 유역의 수문학적 반응을 모의하기 위해 물리적인 기반에 기초한 분포형 모형을 위한 기본방정식을 검토한다. 수리학적 흐름해석에는 대표적으로 동역학과 해석, 확산과 해석, 운동과 해석으로 구분되어지며, 이들 방법들은 흐름의 단순화 정도에 따라 달라진다.

운동과 모형의 주된 장점으로서 단순화된 조건하에서 사용하기 적합한 해석해가 존재하여 검증이 용이하다는 것이고, 넓은 범위의 조건하에서 적용성이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 경계조건으로서 수위-유량 관계곡선이 존재하거나, 배수효과나 역류 및 저류가 나타나는 유역에 대해서는 적용성에 한계를 가진다.

운동과 모형은 1차의 수심-유량 관계가 존재하고 배수효과가 중요한 역할을 하지 않는 경우에만 적용할 수 있는데, 그 이유는 운동과 모형에 있어서 흐름의 동요는 하류방향으로만 전파되기 때문이다. 또한 운동과 모형은 감쇠 또는 확산 등으로 인해 홍수파를 변형시키게 되는데 그것은 유한차분 해석기법이 가지는 고유의 오차에 의하여 발생하는 것이다. 이 경우 수치적인 감쇠

현상은 단지 실제적인 홍수파의 물리적인 감쇠를 모방한 것으로, 이는 기본적인 운동과 방정식에 있어서는 그러한 감쇠를 일으킬 만한 어떤 기구도 존재하지 않기 때문이다. 운동과 모형을 적용하여 강우-유출로 인한 지표류를 추적하는 것은 매우 보편화된 일이며 (Wooding, 1965), 또한 댐 파괴로 인한 개략적인 홍수파 해석에도 적용될 수 있다.

동역학과 방정식은 적용에 있어 많은 어려움이 따르며, 또한 홍수기간 동안에 동역학적 조건에 대한 정교한 정보를 필요로 한다. 불규칙한 지면 표고의 경우, 불연속적인 지표면을 따라 감쇠되거나 마찰에 의해 감쇠되어진 운동학적 에너지의 부분은 지면경사가 비교적 완만한 것으로 가정한 천수 방정식에는 포함되지 않았다. 이것은 관성항들의 불확실성을 내포한다.

이러한 제약으로 인해 많은 연구자들이 운동량 방정식에서 관성항들을 무시하는 단순한 모형을 개발하였고 이것은 물 입자의 운동학적 에너지를 무시하는 것과 동일하다. 이 항들은 대규모 유역에서 홍수가 전파될 동안 동역학적 변수들은 대부분의 모의 영역에서 느리게 변화하기 때문에 매우 작다고 할 수 있다. Natale과 Savi(1991), Defina 등(1994)은 이들 항들에 관계된 수치적 불안정성을 제거하고 작은 수심을 가지는 유역의 흐름을 다루는 수치적 기법의 효율성을 유지하기 위해 운동량 방정식에서 관성항들을 제외하고 보존적인 항들만을 제시하였다. 따라서 2차원 동수역학 모형에서 홍수터 흐름영역의 경우, 관성항들을 Saint-Venant 식에서 무시될 수 있다고 가정할 수 있다. 이는 관성항이 압력항과 마찰 및 중력항에 비하여 그 영향이 작으므로 무시된 흐름으로 해석한 것이다. 이러한 단순화된 가정은 천수 흐름에 대해서만 타당하고 아울러 포물선 형태의 준선형 편미분 방정식에 의해 수학적으로 유도된 모형을 이끌어 낼 수 있다.

이러한 2차원 확산과 집적 방법은 배수영향이 나타나는 경우에 있어 운동과 추적모형을 확장시켰다. 2차원 확산과 모형은 지표류 홍수의 영향에 대한 예측에 있어서 단순하고 경제적인 수단을 제공하였다. 확산과 모형을 비관성 모형이라고 일컬어지는 것은 모형의 기본가정이 운동량 방정식에 있어서 관성항이 중요하지 않은 항으로 고려되어 나온 것이다. 따라서 연속방정식과 운동량방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh(S_{0x} - S_{fx}) - D_{tx} = 0 \quad (2)$$

$$gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh(S_{0y} - S_{fy}) - D_{ty} = 0 \quad (3)$$

비선형 확산과 모형은 운동과 모형에 비하여 커다란 진보가 있었는데 이는 운동량 방정식에 수면경사항  $\frac{\partial h}{\partial x}$  를 포함시키는 것이다. 이 항은 확산과 모형이 홍수파의 감쇠(확산)되는 영향을 기술한다. 이것은 또한 추적구간의 최하류단에서 배수효과 등을 고려할 수 있도록 경계조건을 도입할 수 있게 하였다. 이 방법은 운동량 방정식에 있어서 관성항을 사용하지 않았으므로 보다 균일한 지형을 가진 유역에서 비교적 완만하게 상승하는 홍수파를 해석하는 경우로 제한된다. 일반적으로 지표류와 관련있는 급경사의 경우나 느리게 상승하는 홍수파를 가진 급경사 하천의 경우가 운동과 모형을 사용하기에 적합한 것이고 확산과 모형은 광범위한 적용성을 가지는 것으로서 수로바닥경사가 완만한 경우에 적합한 것으로 알려져 있다.

### 3. 2차원 분포형 모형의 개발

본 장에서는 지표면 흐름과 하도 흐름의 기구를 기술하기 위해서 Saint-Venant의 연속방정식과 운동량방정식을 사용하여 모형을 수식화 하였다. 일반적으로 지표면 흐름은 경사, 지표의 조도, 초과강도와 그 외의 매개변수에 대한 공간적 변화에 의해 지배받는 2차원적 과정으로 나타낼 수 있다. 확산과 근사는 Saint-Venant 운동량방정식의 단순한 형태로 사용하였다. 확산과 방법은 작은 경사와 큰 조도를 나타내는 지역에 대해서 적용할 수 있다는 것과 저류된 물을 표현할 수 있다는 이유로 사용되었다. 이는 산지 유역을 포함한 유역전체의 지형 형상에서 나타나는 부분적 지면 저하로 인한 일시적 배수현상을 확산과 근사가 해결할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 연속방정식과 운동량방정식은 유역내의 각 격자에 대해 동시에 적용된다. 강우강도와 토양특성, 유역특성 등은 각 격자내에서는 동일한 상수로 가정하였으나 격자와 격자간에는 변화할 수 있다. 모의수행 과정에서 각 격자별 유출량은 격자의 크기에 대하여 산정되어 진다.

#### 3.1 강우 및 침투해석

##### 3.1.1 강우해석

강우 조건 및 해석을 위해서 여러 지점의 우량관측 자료나 유역평균 강우량을 적용할 수 있도록 개발하였다. 매 시간간격마다 유역내의 모든 격자요소들에 대한 강우강도가 평가되며, 만약 다수개의 강우관측소 자료

가 사용될 경우, 역거리자승법으로 공간적 변동성을 근사화 한다. 그러나, 관측소의 개수가 한정되어 있는 경우나 유역 내에 가용한 관측소가 없는 경우에는 우량 보간에 있어 과소추정되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 유역 평균강우량 자료의 사용이 가능하게 개발하였고, 티센망에 의한 평균 강우량 자료도 적용할 수 있도록 개발하였다.

### 3.1.2 침투해석

Green-Ampt 모형은 Darcy법칙을 이용한 근사모형으로 최초의 모형은 일정한 초기 함수량을 가진 깊은 균질토에 대한 저류침투를 위해 개발되었다. 토양에 침투된 물은 습윤과 비습윤 영역을 구분하는 습윤전선에 도달한다고 가정한다. 표면에서의 함수를 무시하면 Green-Ampt 식은 식 (4)와 같이 기술된다.

$$f = K \left[ 1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_p}{F} \right] \quad (4)$$

식 (4)의 적분형태는 다음과 같고, 침투율과 침투능이 동일한 지표면 저류를 가정하고 있다.

$$K_t = F - S_p (\phi - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{F}{(\phi - \theta_i) S_p} \right] \quad (5)$$

여기서  $K$  = 유효투수계수,  $S_p$  = 습윤전선에서의 모관 흡인수두,  $\phi$  = 토양공극률,  $\theta_i$  = 초기함수량,  $F$  = 누가 침투량,  $f$  = 침투율을 나타낸다.

Mein과 Larson(1973)은 Green-Ampt 모형을 강우상태에서의 침투에 적용하기 위해 다음과 같이 가정하였다. 즉, 지면담수가 발생하기 바로 직전에는 강우강도가 침투율과 같고 담수가 시작되는 시간( $t_p$ )까지의 누가침투량( $F_p$ )은 강우강도에 지면담수가 발생하기까지의 시간,  $t_p$ 를 곱한 것과 같다. 이로써, 정상상태 강우에 대한 침투율은 다음의 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = R \quad (t \leq t_p \text{ 인 경우}) \quad (6)$$

$$f = K + \frac{K S_p (\phi - \theta_i)}{F} \quad (t \geq t_p \text{ 인 경우}) \quad (7)$$

여기서  $t_p = F_p/R$ ,  $F_p = [S_p (\phi - \theta_i)] / (R/K - 1)$ ,  $R$  = 강우강도를 나타낸다.

식 (7)에 대한 적분형태는 다음과 같다.

$$K(t - t_p + t'_p) = F - S_p (\phi - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{F}{(\phi - \theta_i) S_p} \right] \quad (8)$$

여기서  $t'_p$ 는 침투체적  $F_p$ 에 대응되는 시간으로 지면담수조건하에서는 식 (5)로부터 계산될 수 있다. 일반적으로 Green-Ampt 모형은  $F$ 를 증가시켜 식 (8)을  $t$ 에 대해 풀 다음, 식 (7)을 이용하여  $f$ 를 구함으로써 적용된다. 이 모형을 적용하기 위해 유효투수계수( $K$ )와 습윤전선에서의 모관흡인수두( $S_p$ ), 공극률( $\phi$ ), 초기 함수율( $\theta_i$ )을 측정하거나 계산할 필요가 있다. 이들 매개변수는 실제 침투 데이터를 사용하여 계산되어질 수도 있고, 토양도나 토지이용도와 같은 기존의 가용한 자료들로부터 매개변수를 구할 수 있다.

침투량을 산정하기 위한 방법에는 이외에도 SCS 방법이나 Horton의 침투능 곡선식, Philp 모형 등 여러 방법들이 있으나 본 연구에서는 토양의 물리적인 현상을 상세히 묘사하고 있는 Green-Ampt 모형을 적용하였다.

식 (4)를 시간  $k$ 에서 시간  $k + \Delta t$ 로의 차분형태로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$f^{k+\Delta t} = K \left\{ 1 + \frac{S_p (\phi - \theta_i)}{F^k + \frac{\Delta t}{2} f^{k+\Delta t}} \right\} \quad (9)$$

위의 식 (9)를  $f^{t+\Delta t}$ 에 대해 풀면 다음의 식 (10)과 같은 결과를 얻는다.

$$f^{t+\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} \left[ \xi_1 + (\xi_1^2 + 8 \xi_2 \Delta t)^{1/2} \right] \quad (10)$$

여기서  $\xi_1 = K\Delta t - 2F'$ ,  $\xi_2 = \{K F' + K S_p (\phi - \theta_i)\}$ 를 나타낸다.

침투량은 매 계산시간마다 지표면 유출을 추적하기 이전에 계산되어지게 된다. 즉, 계산시간 간격동안 격자 내에 내린 강우량과 계산되어진 침투량을 비교하여 강우량이 침투량을 초과할 때 지표면 유출이 시작된다. 일반적으로 지표류 유출량 산정 모형에서 침투량이 순수한 손실량으로 취급되어지나 지표류 유출량 산정과 더불어 강우-유출 과정의 전반을 모의하기 위해 본 모형에서는 침투량 중 일부를 다시 지표하 유출로 고려함으로써 강우-유출에 관한 수문학적 접근방법을 완성하는데 사용되어진다.

### 3.2 지표면 및 지표하 유출해석

#### 3.2.1 지표면 유출해석

지표면 유하흐름을 지배하는 유역특성치의 공간적 변화는 격자구조내에서 정의된다. 특성치들은 하나의 격자안에서는 균질하다고 가정하고, 각 격자의 중심점에 할당된 고도값에 기초하여 흐름이 지표면상에서 유출·추적된다.

지표면 흐름의 과정을 나타내기 위해 Saint-Venant의 연속방정식과 운동량방정식이 사용되었다. 2차원 연속방정식과 운동량방정식의 편미분 형태는 다음의 식 (11)~(13)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i - f \quad (11)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{H} \right) + gH \left( S_{fx} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{H} \right) + gH \left( S_{fy} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (13)$$

여기서,  $S_{fx}, S_{fy} = x, y$  방향에 대한 마찰경사,  $H$ =수심,  $h$ =수위,  $g$ =중력가속도,  $q_x, q_y = x, y$  에 대한 단위폭당 유량,  $i$ =강우강도,  $f$ =침투율을 각각 나타내고 있다.

Manning의 식에 의한 마찰경사를 가정하면  $x, y$  방향에 대한 식 (14)~(18)을 얻게 된다.

$$q_i = \frac{1}{n} H^{\frac{5}{3}} S_{fi}^{\frac{1}{2}} \quad (i = x, y) \quad (14)$$

$$q_i = -F_i \left[ \frac{\partial h_i}{\partial i} + M_i \right] \quad (i = x, y) \quad (15)$$

$$\text{여기서, } F = \frac{1}{n} H^{\frac{5}{3}} \left[ \frac{\partial h_i}{\partial i} + M_i \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (i = x, y) \quad (16)$$

$$M_x = \frac{1}{gH} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{H} \right) \right] \quad (17)$$

$$M_y = \frac{1}{gH} \left[ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{H} \right) \right] \quad (18)$$

확산형 방정식의 경우  $M_i = 0$  이므로 식 (19)와 같이 기술된다.

$$q_i = -F_i \frac{\partial h}{\partial i} \quad (i = x, y) \quad (19)$$

식 (17)을 식 (12)에 대입하여 정리하면 2차원 확산형 모형의 일반식은 식 (20)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} F_x \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} F_y \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} + (i - f) \quad (20)$$

확산형 방정식을 해석하기 위해 본 연구에서는 양해법의 중앙차분법을 변형한 격자망 계산방법을 사용하였다. 적용대상지역을 정사각형 격자로 분할 구분하였고, 각 격자에 대한 표고, 조도계수, 위치 등을 분포시켜 유량을 계산하기 위한 수심을 해석하여 격자 시스템 내에서 추적하였다. 그림 1 에서와 같이 임의의 격자의 중심점을  $C$  라 하고 상하좌우의 경계면을 각각 1, 2, 3, 4 방향이라 하면 이웃한 구간에 대한 유량은 식 (21)~(22)와 같이 기술된다.

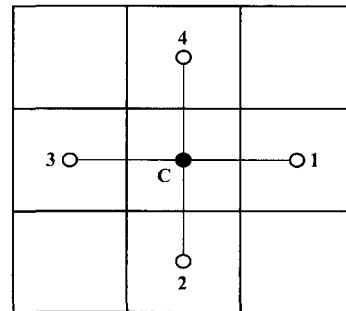


그림 1. 확산형 모형에서의 유한차분망

$$q_{dir_1} = -(F_x)_{dir_1} \left[ \frac{h_1 - h_c}{W} \right], \quad q_{dir_2} = -(F_y)_{dir_2} \left[ \frac{h_2 - h_c}{W} \right] \quad (21)$$

$$q_{dir_3} = -(F_x)_{dir_3} \left[ \frac{h_3 - h_c}{W} \right], \quad q_{dir_4} = -(F_y)_{dir_4} \left[ \frac{h_4 - h_c}{W} \right] \quad (22)$$

여기서, 예를 들면  $C$  구간과 우측의 1번 구간에 대한 식 (21)에서  $F_x$ 는 식 (23)과 같이 기술된다.

$$(F_x)_{dir_1} = \frac{1}{n} H^{\frac{5}{3}} \left[ \frac{h_1 - h_c}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (23)$$

주어진 격자와 시간대에 대하여 각 격자의 경계면에

서의 유량이 계산되고 합산되고, 그 결과로 도출된 유량변화는 구간 내에 대하여 균등하게 분포되어 수심이 계산된다.

본 모형의 경우, 하나의 격자를 기준으로 세 가지 방법으로 계산을 진행할 수 있도록 구성하였다. 첫 번째 방법은 중앙의 격자를 기준으로 주변의 8개의 격자와 마찰경사  $S_f$ 를 결정하여 이 가운데 가장 경사가 급한 하나의 격자로만 흐름이 계산되는 1방향 계산방법과 두 번째로 지표류의 흐름이 직교 방향으로만 이루어진다는 가정하에서 하나의 격자를 중심으로 4방향으로 계산하는 방법, 세 번째로 대각선 방향으로의 흐름도 가능하다고 가정한 8방향 흐름계산 방법으로 나누어 적용하였다. 그림 2의 (a)~(c)는 각각 본 모형에 적용된 1방향, 4방향 및 8방향 흐름해석에 대한 개념도이다.

그림 3은 하나의 격자에 대한 계산 순서를 보여준다. 8방향 모의의 경우, 실제 진행과정에서는 하나의 격자에 대해 일차적으로 직교방향 격자에 대해 계산을 수행한 후, 대각선 방향의 격자에 대해 계산을 수행한다. 대각선 방향으로 계산을 수행할 때에는  $S_0$ 와  $S_f$ 를 계산할 때 격자의 폭  $W$  대신,  $\sqrt{2} \times W$ 를 사용한다.

### 3.2.2 지표하 유출해석

대부분의 수문학적 모형은 지표류만을 유출로써 고

려하였고 지표류를 계산하기 위해 많은 방법들을 제시하였다. 그러나 지표류 개념은 산림이 우거진 산악 유역에서는 적용이 쉽지 않다.

Loukas와 Quick(1991)은 캐나다의 British Columbia 지역의 산림이 우거진 산악 유역에서 미세한 표면 흐름은 지표류가 아니라 표토층을 통한 조기지표하 흐름이라고 밝힌 바 있다. 또한, 강우의 대부분이 표토층으로 빠르게 침투하여 관수로 흐름과 같이 아래쪽으로 흐르므로 산림이 우거진 산악 유역에서는 지표류와 더불어 지표하 유출도 고려되어야만 한다고 연구한 바 있다.

유역에서 강우 사상의 결과로 발생한 물은 토양 형태에 따라 지표류 혹은 지표하 흐름을 발생하게 될 것이고, 만약 유역의 토양이 높은 투수계수를 나타낸다면 대부분의 물은 지표하로 침투될 것이다. 물이 지표하로 들어가게 된다면, 물은 측면으로 이동하여 하도를 만나게 되어 하도 흐름으로 추적되고 결국은 유역 밖으로 빠져나가게 된다. 본 연구에서는 지표면 흐름 해석 뿐만 아니라 지표하 흐름추적에 대한 추적과정도 추가하였다.

지표하 흐름을 표현하기 위해 Saint-Venant 방정식을 사용하였다. 편미분 형태의 2차원 연속 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

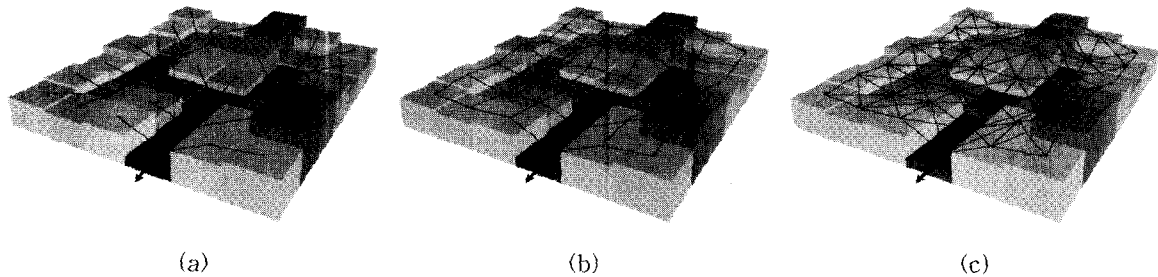


그림 2. 지표류 흐름해석에 대한 개념도

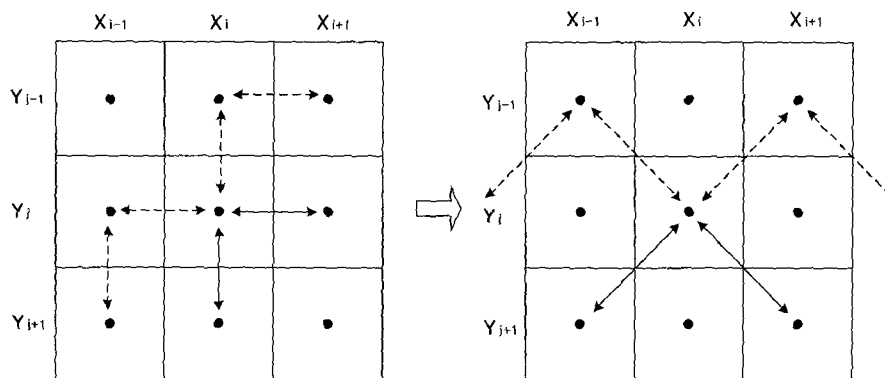


그림 3. 흐름방향에 따른 지표류 계산절차

$$\frac{\phi \partial h_{sub}}{\partial t} + \frac{\partial q_{(sub)_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{(sub)_y}}{\partial y} = f \quad (24)$$

여기서  $h_{sub}$ =지표하 흐름 수심,  $q_{(sub)_x}$ =x 방향 지표하 단위폭당 유량,  $q_{(sub)_y}$ =y 방향 지표하 단위폭당 유량,  $f$ =투수율,  $\phi$ =공극율,  $t$ =시간을 나타낸다.

2차원 운동량 방정식은 지표면 유출에서 동일한 과정을 거쳐 확산과 근사를 사용하여 간단히 할 수 있었다. 그렇게 하면 하상경사와 마찰경사를 제외한 모든 항들은 무시할 수 있고 식 (25)와 같이 기술된다.

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h_{sub}}{\partial x}, \quad S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h_{sub}}{\partial y} \quad (25)$$

여기서  $S_{ox}, S_{oy}$ =x, y 방향의 하상경사,  $S_{fx}, S_{fy}$ =x, y 방향의 마찰경사,  $h_{sub}$ =지표하 유출의 수심을 나타낸다.

지표하 흐름에 대한 저항 법칙은 속도와 유량을 깊이에 연관시키고 깊이-유량 관계로 공식화 된다. 포화 다공성 토양을 통과하는 흐름은 Darcy 법칙으로 수식화할 수 있다.

$$q_{(sub)_i} = -K h_{(sub)} \frac{\partial h_{sub}}{\partial i} = -K h_{(sub)} S_{(sub)fi} \quad (i = x, y) \quad (26)$$

여기서  $K$ = 투수 계수,  $\frac{\partial h_{sub}}{\partial i}$ =지표하 흐름에 대한 마찰경사=  $S_{(sub)fi}$  ( $i = x, y$ ),  $h_{(sub)}$ =지표하 수심을 나타낸다. 지표하 유출을 모의하기 위해 2차원 양해법을 사용하였다.

질량 보존의 법칙에 의해 임의의 시간간격동안 하나의 요소에 들어간 총 질량은 같은 시간 단계에서 같은

요소 내의 질량 변화에 비례한다. 지표하 유출 알고리즘을 추가한 목적은 주어진 시간 단계의 끝에서 지표하 흐름의 깊이와 수로로 이동하는 지표하 유출을 계산하기 위함이다. 모형은 침투량 계산과정을 통해 침투 깊이를 얻을 수 있고, 지표하 흐름의 단위폭당 유출량은 마찰 경사  $S_f$ 의 부호에 의한 흐름 방향에 기초하여 계산된다.

그림 4는 지표하 유출량이 하도 유출량에 기여하게 되는 과정에 대한 개념도이다.

### 3.2.3 하도흐름 해석

하도망은 여러 개의 수로절점들에 의해 나뉘어진 일련의 연결된 하도들로 정의할 수 있다. 하나의 수로절점은 하나의 격자에 해당한다. 각각의 수로절점에 대해서 하도의 폭, 수심, Manning의 조도계수 및 하상표고를 포함한 하도 특성치들로서 정의된다. 지표면 유출이 하도격자에 도달하게 되면, 하도내의 흐름을 추적하기 위해 식 (27)과 같은 연속방정식이 적용된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (27)$$

여기서  $A$ =흐름의 단면적,  $Q$ =유량,  $q_i$ =단위길이당 측방유출입량을 나타낸다.

하도내의 난류 흐름조건을 가정하여, Manning의 경험식을 적용할 수 있는데, 하도의 유량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (28)$$

운동량 방정식의 확산과 근사해에 기초하여 지표면 격자에 대한 마찰경사를 결정하는데 사용된 식은 하도망 내에서 하상표고로 계산된 하상경사와 함께 하도격자에 대해 그대로 사용되어진다. 하도추적은 유역에서

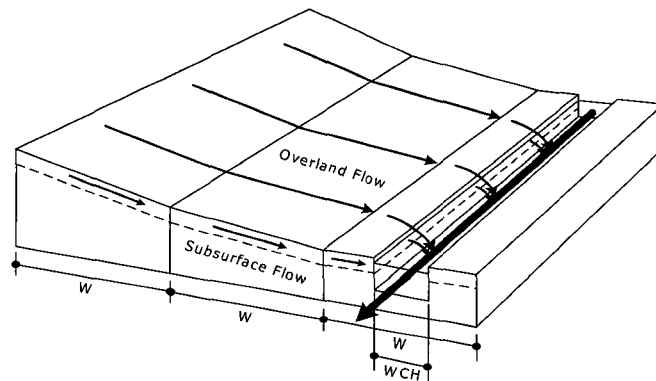


그림 4. 지표하 흐름추적에 대한 개념도

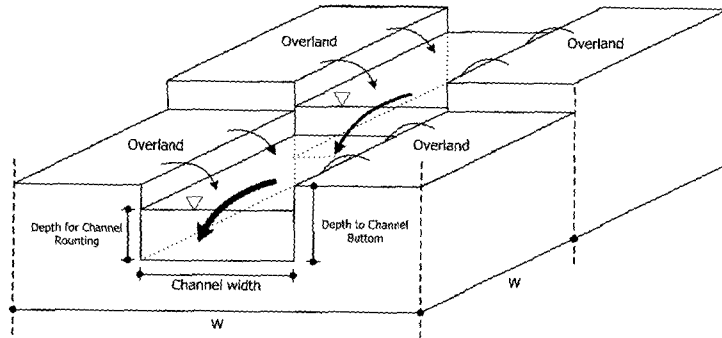


그림 5. 하도추적에 대한 개념도

최상류단에서부터 시작하여 유역의 출구쪽으로 진행되며, 모의결과로 제시될 수문 곡선은 사용자가 지정한 하도상의 관심지점에 대해 작성되어진다. 다음의 그림 5는 모형에서 적용되는 하도형상과 하도 추적에 대한 개념도이다.

### 3.2.4 Monte Carlo 모의

Monte Carlo 모의수행은 모집단의 가정된 확률분포로부터 무작위로 선택한 값을 추계학적 입력값이나 불확실한 변수의 값으로 사용하여 많은 횟수에 걸쳐 반복 수행하는 방법이다. 각 모의수행마다 모형구조에 따라 하나의 출력값 혹은 출력값들의 집합을 도출할 수 있다. 이러한 출력들이 모여졌을 때, 빈도분포의 향으로 구성된 예측을 할 수가 있다. 이 빈도분포의 정확도는 모의수행의 횟수에 달려있다. 이 방법은 개념적으로 단순하고 이론적으로도 타당하여 많은 연구자들에 의해 수치 모형에 적용되었다.

Monte Carlo 모의수행은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합에 기초하여 실제 상황을 반복수행하는 모의발생 과정이다. 공학적인 목적을 위해서 모의수행은 시스템의 실행이나 반응을 예측하거나 조사하는데 적용될 수 있다. 모의 수행과정은 시스템 매개변수에 대한 미리 규정된 일련의 값들을 이용하여 모형의 실행이나 반응에 대한 구체적이고 정량적인 표현을 얻게 된다. 많은 연구자들에 의해서 Monte Carlo 기법에 대한 연구결과는 기대되는 시스템의 반응이 동일한 시스템에 대한 확정론적 해와 상이할 수 있다는 것을 제시한 바 있고, Monte Carlo 해석 결과가 확정론적 결과에 비하여 안정된 해를 제시하는 것으로 나타났다.

Monte Carlo 모의수행을 위해 난수를 발생시키는 기본 공식은 식 (29)와 같다.

$$Z_i = aZ_{i-1} + c(\text{mod } m), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (29)$$

위 식과 같은 합동법(congruential method)은 주어진 연속된 정수  $Z_i$ 에 의한다. 여기서  $a$ ,  $c$  와  $m$  은 주어진 적당한 상수이며, 우측의 2번째 항은 식 (30)과 같이 기술된다.

$$x(\text{mod } m) = \left[ \frac{x}{m} \right] \quad (30)$$

다른 방법으로 가산합동법(additive congruential method)이 있는데, 이것은  $k+1$  개의 초기값  $Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ 가 주어진 상태에서 그 다음 정수는 식 (31)에 의하여 표시된다.

$$Z_{i+1} = Z_i + Z_{i-k}(\text{mod } m), \quad i = k, k+1, k+2, \dots \quad (31)$$

만약  $k=1$  이면 이것은 Fibonacci 수열이 된다. 일반적으로  $k$ 가 커질수록 난수 발생법이 좋아진다고 알려져 있다. 실제로 얻고자 하는 난수는 식 (29), (30)에서 얻어지는 정수를  $m$ 으로 나눈 값, 즉  $Z_i/m$ 이 된다. 본 연구에서는 식 (32), 식 (33)과 같은 multiplicative congruential generator를 이용하였다.

$$X_{i+1} = aX_i(\text{mod } m) \quad (32)$$

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (33)$$

여기서  $a = 16807$ ,  $m = 2^{31} - 1$ ,  $(\text{mod } m)$ 은 modules  $m$ 에 의한 나머지 값,  $X_i$ 는 균등난수를 발생시키기 위한 초기값,  $U_i$ 는 균등분포에 의한 난수를 나타내고 있다. 본 모형은 강우, 차단, 침투, 지표면 유출추적, 지표하 유출추적, 하도 유출추적의 순서로 모의가 진행되도록 구성되어 있다. 차단과 침투가 이루어진



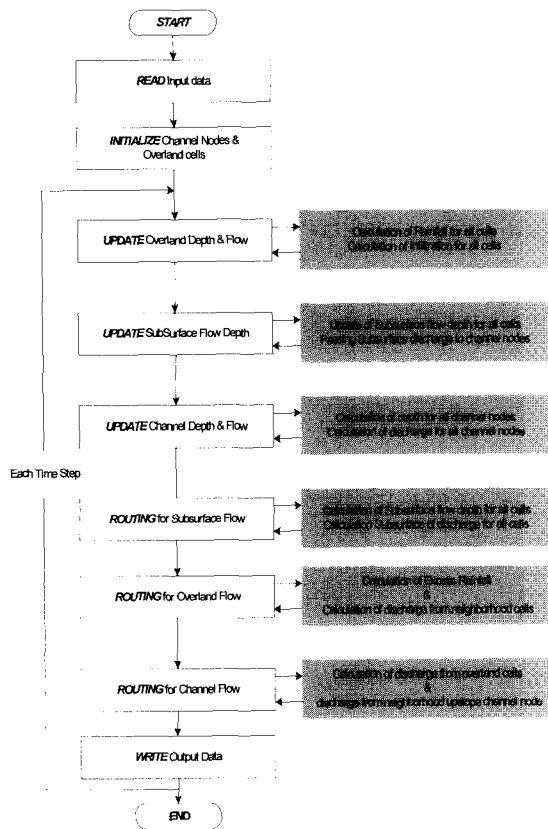


그림 6. 확정론적 모형의 계산 흐름도

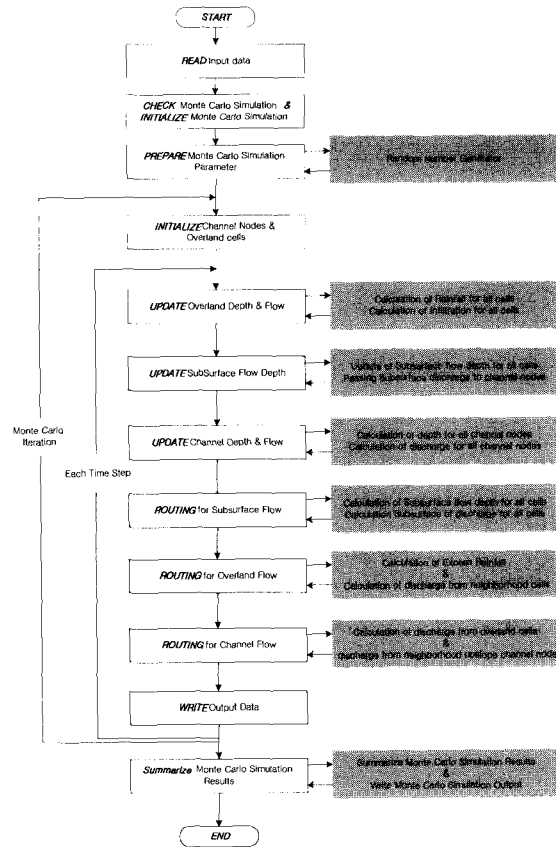


그림 7. 추계학적 모형의 계산 흐름도

후, 초과강우는 지표유출을 이루게 되고, 침투된 유량은 다시 지표하 유출을 형성하여 하도로 유입되어진다. 유출은 2차원 유한차분법에 기초하여 지표면 유출과 지표하 유출을 모의하고, 하도로 유입된 지표면 유출과 지표하 유출은 1차원 유한차분기법에 의한 하도유출로 모의된다. 다음의 그림 6과 7은 확정론적 모의수행과정과 추계학적 모의수행과정을 개괄적으로 보여주고 있다.

#### 4. GIS와의 연계

수치해석모형과 GIS를 연계시키는 방법은 GIS 소프트웨어가 가지는 기능의 사용범위에 따라 다음의 세 가지로 구분될 수 있다. Loose coupling 혹은 Ad hoc Integration 단계, Tight coupling 혹은 Complete Integration 단계, Flexible coupling 혹은 Partial Integration 단계가 그것이다. 본 연구에서는 Flexible Coupling 방법을 사용하였으며 이 방법은 수치해석모형의 전·후처리에만 GIS 소프트웨어를 사용하는 것으로, Loose coupling과 다른 점은 두 시스템간의 인터페이스를 개발한다는 점이다. 즉, 모의에 필요한 매개변수들을 GIS 소프트웨어에서 추출하고, 개발된 인터페이스를 통해 기존의 수치해석모형에 적용한 후, 그 결과를 GIS에

서 표현하는 방법이다. 이 방법은 Loose coupling에 비해 GIS 소프트웨어의 기능을 훨씬 많이 이용하는 것이고, Tight coupling에 비해 많은 시간이 절약된다.

본 연구에서는 이러한 여러 종류의 소프트웨어들을 자세히 검토하여 전세계적으로 가장 널리 사용되어지고 있는 Arc/Info와 ArcView를 이용하여 본 연구에서 개발된 모형과 연계하였다. 일반적으로 유역에서의 강우-유출과정을 모의하고 그 결과를 활용하기 위한 의사결정 지원시스템으로서 필수적으로 갖추어야 할 기능으로는 (1)수치지도 및 수치지형 자료의 관리기능, (2)강우-유출 자료의 관리를 위한 데이터베이스 처리기능, (3)강우-유출 모형과의 연계를 위한 인터페이스, (4)사용자 편의를 위한 기능 등이 있다.

본 연구에서 개발된 모형의 경우, 주요 입력자료들을 GIS 시스템에서 제공되는 격자자료를 이용하도록 구성되어 있어 GIS 시스템을 이용한 자료구축이 필수적인 과정이다. 실제 대상유역에 대한 격자자료를 수작업으로 구축한다는 것은 거의 불가능한 일이며, 오류가 발생할 가능성도 매우 높다. 이에 본 연구에서는 앞에서 개발된 모형의 입력자료를 구축하기 위한 GUI를 ArcView 상에서 구축하여 작업의 효율성을 높이고 일

관성을 유지하도록 하였다. 사용자 편의시스템의 구축은 국가지리정보시스템 구축사업을 통해 구축된 방대한 양의 자료를 활용하기 위해서도 필수적인 도구이다.

본 연구에서는 모의수행을 위한 입력자료를 구축하기 위한 3개의 주 메뉴들과 결과의 출력을 위한 1개의 주 메뉴를 가지도록 구성하였고, 각각의 주 메뉴들은 여러개의 부 메뉴들을 포함하고 있다. 첫 번째 메뉴는 대상지역의 수치고도자료의 구축 및 기본적인 유역분석이 가능하도록 구축하였고, 두 번째 메뉴는 우량계의 위치자료와 강우량자료, 토양균별 특성자료, 지표면 조도계수, 하도에 대한 특성자료 등을 쉽게 구축할 수 있

도록 하였다. 세 번째 메뉴를 통해 지표하 유출의 고려 여부와 지표류의 흐름방향 선택, 계산 시간간격 등 확정론적 모의수행에 필요한 자료와 추계학적 모의수행을 위해 요구되는 Monte Carlo 모의횟수나 분포형의 결정, 적용 매개변수 등의 입력자료를 구축할 수 있다. 네 번째 메뉴는 모의수행 결과의 출력을 위한 메뉴로써 모의수행 결과를 Grid로 변경하여 ArcView 상에 도시할 수 있도록 구성되었다.

그림 8은 본 연구에서 구축된 GUI에 대한 메뉴구성을 보여주고 있다.

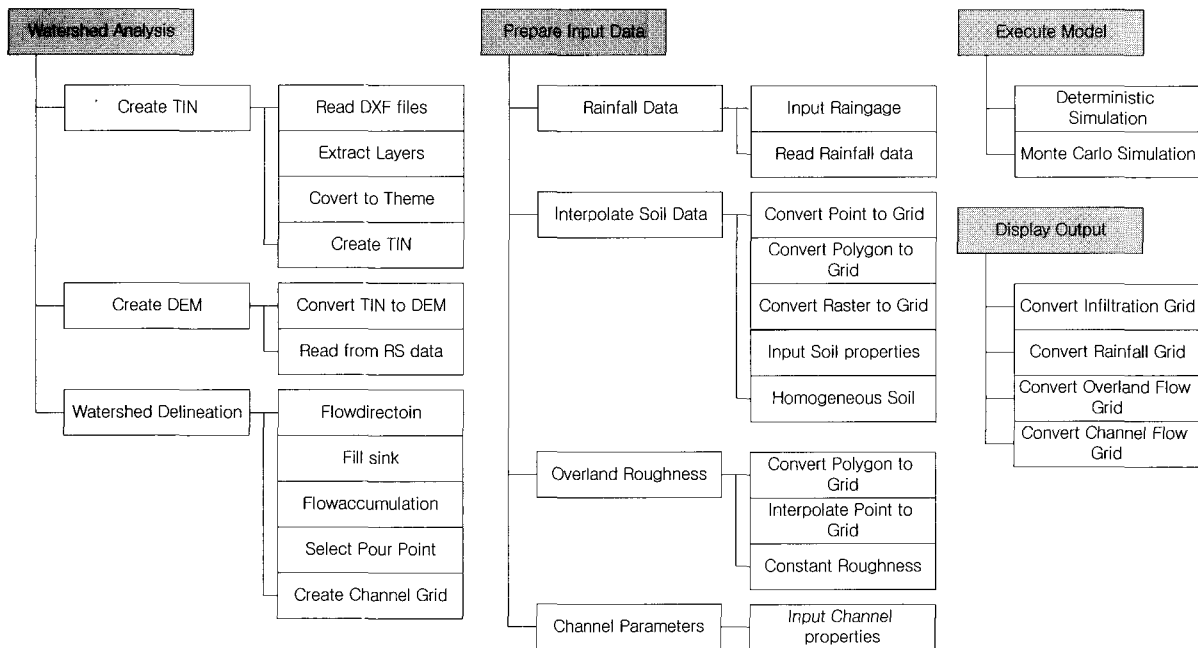


그림 8. GUI 구성을 위한 메뉴 설계

## 5. 결 론

본 연구에서는 확산과 방정식을 이용한 2차원 유한차분모형을 개발하여 유역내의 지표류 및 지표하 유출에 대한 2차원 흐름추적과 하도에 대한 1차원 흐름추적이 가능한 분포형 강우-유출 모형을 개발하였다. 특히 지표류 및 지표하 흐름의 모의에 있어서 1, 4, 8방향 흐름추적이 가능하도록 구현하여 각 흐름방향별 비교가 가능하게 하였다. 본 연구를 통해 유역 강우-유출과정의 물리적 거동에 기초한 모형을 개발하므로써 기존의 연구에 비해 정교한 모의를 실시할 수 있었다. 또한, 불확실도 해석기법인 Monte Carlo 기법을 적용하여 매개변수의 불확실도 해석이 가능한 2차원 강우-유출 모형을 개발하였다.

본 연구모형의 입력자료와 출력자료는 Arc/Info와

ArcView상에서 구축, 도시되었다. 이러한 방법을 통해 향후 인공위성자료나 국가수치지형도 사업의 성과로 활용될 수치자료의 활용성을 제고하였고, 모의결과에 대한 직접적인 도시가 가능하도록 구성하였다. 특히, 기존 모형들과 차별화하여 유역의 표고, 토양, 하도망 등과 관련된 입력자료를 구성함에 있어 유역의 공간적 변동성을 고려하기 위해 GIS를 통한 입력자료 구축 및 활용이 가능하도록 구성하여 ArcView 상에서 강우-유출 모형의 모의수행이 가능하도록 구현하였다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-2-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김상현 (1997). "인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용.", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 539-548.
- 배덕효, 김진훈, 권원태 (2000). "TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구.", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.
- 조홍제, 조인률, 김정식 (1997). "TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구.", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 515-526.
- 한건연, 이재영, 최현상 (2002). "지표홍수류 해석을 위한 2차원 유한요소모형의 개발.", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제4-B호, pp. 421-428.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). "An introduction to the European hydrological system-Système Hydrologique Européen(SHE), 2 : Structure of a physically based, distributed modeling system.", *Journal of Hydrology*, Vol. 87, pp. 45-59.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979). *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology.*, Hydrological Sciences Bulletin, Vol. 24, pp. 43-69.
- Chairat, S. and Delleur, J.W. (1993). *Effects of the topographic index distribution on predicted runoff using GRASS.*, Water Resources Bulletin, Vol. 29, No. 6, pp. 1029-1034.
- ESRI (1998). *Advanced ArcView GIS*, ESRI
- ESRI (1998). *Programming with Avenue.*, ESRI
- Gao, X., Sorooshian, S., and Goodrich, D.C. (1993). "Linkage of a GIS to a distributed rainfall-runoff model.", *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*, Oxford University Press, Oxford, pp. 182-186.
- Loukas, A. and Quick, M.C. (1993). "Hydrologic behaviour of a mountainous watershed." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 1-8.
- Maidment, D.R. (1993). "GIS and hydrologic modeling.", *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*, Oxford University Press, Oxford, pp. 147-167.
- Mein, R.G. and Larson, C.L. (1973). "Modeling Infiltration During a Steady Rain.", *Water Resources Research*, Vol. 9, pp. 384-394.
- Saghafian, B. and Julien, P.Y. (1995). "Time to equilibrium for spatially variable watersheds.", *Journal of Hydrology*, Vol. 172, pp. 231-245.
- Wooding, R.A. (1965). "A hydraulic model for the catchment-stream problem, I. Kinematic-wave theory.", *Journal of Hydrology*, Vol. 3, pp. 254-267.

(논문번호:03-78/접수:2003.09.26/심사완료:2004.03.29)