

山地 小流域의 洪水流出 豫測을 위한 模擬發生 水文模型의 開發

Development of Hydrologic Simulation Model to Predict Flood Runoff in a Small Mountaineous Watershed

權 純 國* · 高 德 九*
Kwun, Soon Kuk · Koh, Deuk Koo

Summary

Most of the Korean watersheds are mountaineous and consist of various soil types and land uses. And seldom watersheds are found to have long term hydrologic records. The SNUA, a hydrologic watershed model was developed to meet the unique characteristics of Korean watershed and simulate the storm hydrographs from a small mountaineous watershed. Also the applicability of the model was tested by comparing the simulated storm hydrographs and the observed from Dochuk watershed, Gwangjugun, Kyunggido.

The conclusions obtained in this study could be summarized as follows :

1. The model includes the simulation of interception, evaporation and infiltration for land surface hydrologic cycle on the single storm basis and the flow routing features for both overland and channel systems.

2. Net rainfall is estimated from the continuous computation of water balance at the surface of interception storage accounting for the rainfall intensities and the evaporation losses at each time step.

3. Excess rainfall is calculated by the abstraction of infiltration loss estimated by the Green and Ampt Model from the net rainfall.

4. A momentum equation in the form of kinematic wave representation is solved by the finite differential method to obtain the runoff rate at the exit of the watershed.

5. The developed SNUA Model is a type of distributed and event model that considers the spatial distribution of the watershed parameters and simulates the hydrograph on a single storm basis.

6. The results of verification test show that the simulated peak flows agree with the observed in the occurrence time but have relative errors in the range of 5.4-40.6% in various flow rates and also show that the simulated total runoff have 6.9-32% of relative errors against the observed.

7. To improve the applicability of the model, it was thought that more studies like the application test to the other watersheds of various types or the addition of the other hydrologic components describing subsurface storages are needed.

*서울대학교 農科大學

I. 緒 言

지금까지 우리나라에서 農業用水 開發事業을 수행하는 과정에서 洪水流出을 예측하는 데는 가지야마(梶山)式을 비롯하여 合理式, 單位圖法等의 경험적인 방법들에 의존해 왔다. 그러나 이런 방법들은 매우 복잡하게 조직되어 있는 降雨와 流出間의 水文循環過程을 과도하게 단순화시킨 것들로서 범용적인 適用性과 결과의 信賴性에 있어서는 상당히 낮은 것으로 평가되고 있다. 5.7)

따라서 보다 효율적이고도 정확하게 流域의 水文現象을 해석하기 위해서는 이미 선진외국에서 20여년전부터 開發되고 實用化된 것과 같은 確定論的 模擬發生 水文模型을 導入하거나 自體開發이 절실히 요구되고 있다. 確定論的 模擬發生 水文模型이라 함은 降雨로부터 시작되는 여러가지 水文舉動의 실제상황을 數學的인 式으로 表現하고, 이를 해석하여 流出의 時間的, 空間的 變化를 예측할 수 있도록 해주는 도구로써, 그의 適用에는 방대한 數式的 계산이 요구되므로 주로 高性能의 電子計算機가 이용된다.

우리나라에서도 최근에 와서 탱크모형이나 CREAMS, HEC-1, KWM, USDAHL-74, SSARR 모형등 외국에서 개발된 몇가지 電算水文模型이 도입되어 일부 실용화되고 있으며, 適用試驗도 거친 바 있으나, 아직 그 運用技術上的 문제나 우리나라 流域의 고유한 特性, 빈약한 水文觀測記錄等の 문제가 산재해 있어 광범한 이용이 정착되지는 못하고 있는 실정이다. 1.2.3.4.6.7.8.9)

本 研究은 대부분의 유역이 未計測상태이고, 山岳地가 많고, 土地利用 및 土壤分布의 樣相이 다양한 우리나라 小流域 特性에 알맞는 流域水文模型을 開發하는데 그 目的이 있다. 그리고 開發된 模型을 대표시험유역에 적용시켜 暴雨流出의 水文曲線을 模擬發生시키고 이를 實測 水文曲線과 비교, 분석하므로써 模型의 模擬發生能力을 검토하고자 하였다.

II. 理論的 背景

일반적으로 流域水文模型이라 함은 질량, 에너지 및 운동량보존법칙과 몇가지 經驗的 理論들을 바탕으로 水文循環系內에서의 時間的, 空間的 물의 이동을 數學的으로 表現하는 것이라 할 수 있다.¹⁰⁾ 水文循環系는 여러과정이 매우 복잡하게 연

계되어 있을 뿐아니라, 각각의 要素도 역시 복잡한 매카니즘으로 조직되어 있어, 아무리 고성능의 電算機를 이용한다 하더라도 全體 水文循環系를 완벽하게 서술하고 해석하는 것이 쉽지 않다.

본 연구에서는 폭우시의 직접유출, 즉 지표면유출의 실제 자연현상을 數學的으로 再現하여 模擬發生시킬 수 있는 流域水文模型을 개발하고자 가급적 이에 관련되는 모든 水文要素들을 고려하였으며, 그 要素들은 遮斷과 蒸發, 土壤浸透, 地表와 河川에서의 흐름등이다.

본 모형에서 채택한 主要水文要素들을 지배하는 理論 및 法則들을 소개하면 다음과 같다.

1. 遮斷^{16, 17)}

降雨는 地面에 도달하기 전에 植生이나 地表被覆物등에 먼저 떨어져 一時 貯留가 되어 地表面流入이 방해를 받는다. 이러한 현상을 遮斷이라 하며, 이 遮斷의 貯留能은 時間이 지남에 따라 降雨強度, 蒸發과 바람등의 영향으로 계속 변하게 된다. 따라서 실제 地表에 도달하는 雨量을 예측하기 위해서는 遮斷面에서의 물수지가 연속적으로 계산되어야 한다.

Table-1. Conditions and algorithms for calculating the rainfall reaching the ground

Condition	Algorithm
tree, ground cover	$I - I_c - I_g$
tree, no ground cover	$I - I_c$
no tree, ground cover	$I - I_g$
no tree, no ground cover	I

遮斷물수지는 植生과 地表被覆物의 상태에 따라 달라지므로, 본 모형에서는 먼저 Table-1과 같이 차단조건을 분류하고, 각 조건별 地表到達雨量 計算을 위한 알고리즘을 작성하였다. 여기서 I 는 실제우량이고, I_c, I_g 는 각각 식생과 지표피복의 차단량이다.

한편, 식생과 지표피복에서의 차단물수지는 다음과 같이 계산하였다.

$$I_c(t) = I(t) \quad \text{if } \sum I(t) dt \leq (1 - I_s) \cdot V_c \quad \dots(1)$$

$$I_c(t) = E \cdot S_c \quad \text{if } \sum I(t) dt > (1 - I_s) \cdot V_c \quad \dots(2)$$

$$I_g(t) = I(t) \quad \text{if } \sum I(t) dt \leq (1 - I_s) \cdot V_g \quad \dots(3)$$

$$I_g(t) = E \cdot S_g \quad \text{if } \sum I(t) dt > (1 - I_s) \cdot V_g \quad \dots(4)$$

여기서 V=단위면적당 차단저류능

S=투영면적에 대한 실제 증발면적의 비율

E=시간당 증발율

c, g=각각 식생과 지표피복을 나타내는 지표

t=경과한 시간

I_s=초기 차단저류량

2. 浸透

지표에 도달한 降雨은 먼저 地表面凸凹部에 저류되거나 토양으로 浸透되며, 이를 초과하는 강우량은 지표면을 통해 흘러나가게 된다. 따라서 하천 유출의 근원이 되는 地表面流出量을 예측하기 위해서는 지표저류능과 토양침투능의 산정이 선행되어야만 한다.

이중 地表面貯留能은 아직 측정방법이나 산정방법이 뚜렷이 정립되지 못해 추정에 의존하는 경우가 많으며, 실제 수문순환내에서 차지하는 比重도 미미한 것으로 판단되어 본 모형에서는 보정에 의한 매개변수로 간단히 취급하였다.

한편 土壤의 浸透能은 대개 시간이 경과함에 따라 계속 변화하는 것으로 밝혀져 이를 數學的으로 표현하고자 하는 많은 연구들이 이루어져 왔다. 이중 대표적인 것들로 Kostiaikov, Horton, Philip, Holtan 및 Green and Ampt 등의 경험식들을 들 수 있다.^{5, 10} 그러나 대부분의 經驗式들이 地表面湛水상태의 조건에 대해 개발된 반면, 실제의 降雨은 시시각각 그 強度를 달리하는 경우가 보통이므로 이의 浸透量을 決定하기에는 어려운점이 많다.

本 模型에서는 降雨의 浸透量 算定에 있어서 비교적 物理的인 意味를 갖는 因子들이 포함되고, 근래에도 그 利用이 활발한 Green and Ampt의 식을 채택하였다.^{10, 15} 더우기 이 식은 1970년대에 들어 강우의 침투량 산정에 응용될 수 있도록 많은 개선이 이루어져 流出量 模擬發生을 위한 水文模型의 浸透量算定要素로써 더욱 적합하게 되었다.

Green and Ampt¹⁵는 實驗을 통해 土壤의 浸透能 f_p는 累加浸透量 F와 土壤의 透水係數 K, 有效吸濕力 S, 포화상태에 대한 不足水分量 M의 함수로 나타낼 수 있음을 밝히고 다음 (5) 식과 같은 浸透能曲線式을 開發하였다.

$$f_p = \frac{dF}{dt} = K(1 + S \cdot M/F) \dots\dots\dots (5)$$

Mein and Larson¹⁹과 Swarzendruber²¹는 (5)식을 응용하여 均一強度의 降雨時 지표면이 湛水상태에 이르는 시간을 計算할 수 있도록 하므로써, 湛水前後에 대해 별도로 침투량을 계산할 수 있도록 하였다.

Chu¹⁴는 이를 더욱 개선하여 降雨強度 변화에 따른 지표면담수의 발생과 소멸을 예측할 수 있는 물수지계산 알고리즘을 고안하여 不均一한 降雨의 浸透量 산정까지도 가능하게 하였다.

3. 地表面 및 水路에서의 흐름

流出水의 흐름은 크게 地表面에서의 흐름과 水路에서의 흐름으로 나눌 수 있으며, 그 양상은 연속방정식과 운동량 방정식 및 몇가지 흐름抵抗法則에 의해 해석될 수 있다.

流出水의 흐름을 지배하는 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{5, 15, 17, 21}

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_r \dots\dots\dots (6)$$

여기서 Q=流量

A=流水斷面積

q_r=單位幅當 側方流入量

x, t=각각 거리와 시간

(6) 식에서의 유량과 유수단면적간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \alpha \cdot Q^\beta \dots\dots\dots (7)$$

여기서 α, β=수로형상과 조도에 따른 계수

한편, 自然河川이나 地表面 흐름은 대부분 不等流상태로써 주로 흐름저항과 중력에 영향을 받는 것으로 보면 운동량 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_o = S_f = n^2 \frac{Q^2}{2.21 \cdot R^{4/3} \cdot A^2} = f \frac{Q^2}{8gRA^2} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 S_o, S_f=水路바닥과 水面의 傾斜

n, f=Manning의 粗度係數와 Darcy-Weisbach의 抵抗係數

g=重力加速度

R=動水半徑(=A/P)

P=潤濕의 길이

(6), (7), (8) 식을 이용하여 流出量을 추적하는 것을 動水波法(Kinematic Wave Method)이라 하며, 이의 해석은 주로 數值解釋技法에 의존한다.

일반적으로 開水路흐름해석에는 Manning공식을 많이 쓰는 경향이기는 하나, 이 식에는 經驗的이거나 主觀的인 要素가 많이 포함되어 있을 뿐아

나라 흐름상태나 水深에 따른 抵抗의 변화를 나타내 주지 못하므로 주로 얕은 水深의 層流를 이루는 地表流의 해석에는 부적합한 것으로 판단되었다. 본 모형에서는 이런 단점들을 극복할 수 있는 방법으로 Darcy-Weisbach의 공식을 채택하였으며, Streeter and Wylie²¹⁾ 등은 抵抗係數 f를 降雨強度와 流水斷面의 粗度, Reynolds Number의 함수로써 나타내고자 다음과 같은 일반식을 제시하였다.

$$f = \frac{a}{N_r^b} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 N_r 은 Reynolds Number이며 a, b는 N_r 과 降雨強度, 流水斷面의 粗度의 함수로써 표현되는 계수이다.

III. 模型의 開發

暴雨時 直接流出에 관계되는 水文過程을 II 장에서의 理論과 法則에 의해 數式化하고, 이를 다시 電算프로그램으로 작성하므로써, 電算機에 의한 고속의 계산을 통하여 각 水文過程別 물의 이동을 模擬發生시켜 流域 最末端에서 시간별 流出量을 계산할 수 있는 電算模擬發生模型을 개발하였고, 이를 SNUA 流域 水文模型이라 命名하였다. 各 水文現象의 模型化와 電算프로그램의 개발 과정 및 개발된 模型의 構成은 다음과 같다.

1. 水文現象의 模型化

가. 超過降雨量의 算定

超過降雨量은 실제우량으로부터 遮斷과 浸透에 의한 손실을 뺀 나머지로써 실제로 流去되는 降雨量이라 할 수 있다.

먼저, 遮斷에 의한 손실을 (1), (2), (3), (4)식에 의해 자료로써 입력되는 降雨量과 蒸發量, 그 시점의 遮斷貯留能으로부터 계산하고, 다시 이량으로부터 地表到達降雨量과 다음 시점의 遮斷貯留能을 계산하는 과정을 반복하게 하였다.

다음, 浸透에 의한 손실은 土壤浸透能과 地表面 澁水상태, 지표도달 강우의 강도로 부터 계산될 수 있으므로 다음과 같은 물수지식을 이용, 超過降雨量의 계산과 地表面 澁水조건을 판단하였다.

$$P(t) = F(t) + G(t) + R(t) \dots\dots\dots (10)$$

여기서 t는 강우개시후 경과한 시간이며, P와 F, R은 각각 累加降雨量, 累加浸透量, 累加流去量(超過降雨量)이고, G는 地表面澁水量이다.

(10)식에 (5)식의 Green and Ampt의 공식을 적용하기 위해서는 이를 積分해야 한다.

담수개시시간 t_0 이전에는 강우강도가 토양의 침투능보다 작아 全降雨量이 토양으로 침투한다고 보았으며, 이 때까지의 누가침투량 F_0 와 t_0 이후 어느 시점 t에서의 누가침투량 F를 제한조건으로 (5)식을 적분하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$F/SM - I_n(1 + F/SM) - F_0/SM + I_n(1 + F_0/SM) = K(t - t_p)/SM \dots\dots\dots (11)$$

한편 담수개시시간 t_p 는 그 순간에 다음 (12)식과 같은 조건이 성립되므로 (5), (12)식을 (10)식에 대입하여 (13)식을 유도하였다.

$$I(t_p) = F_p \dots\dots\dots (12)$$

$$P(t_p) - R(t') - K \cdot SM / (I(t_p) - K) = 0 \dots\dots (13)$$

여기서 t'는 직전의 시간대이고 (11)식과 (13)식은 非線型的 陰函數로서 Newton's iteration method로 해석하였다.

한편 지표도달강우는 차단의 조건에 따라 달라지고, 따라서 지표면에서의 물수지도 달라지므로 식생과 지표피복의 유무에 따라 별도로 초과강우량을 계산한 후 다음의 식에 의해 平均 超過降雨量을 산정하였다.

$$ER = D_c \cdot ER_c + (1 - D_c) \cdot ER_o \dots\dots\dots (14)$$

여기서 ER=超過降雨量

D_c = 植生이 있는 부분의 全體面積에 대한 比
 c, o = 植生有無를 나타내는 지표

나. 流出 追跡

流出水의 時間的, 空間的 이동은 (6)의 연속방정식에 의해 계산된다. 본 모형에서는 (6)의 편미분방정식을 해석하는데 유한차분법을 사용하였다.

이때 (6), (7)식을 有限差分式으로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta x} + \frac{A_{j+1}^{n+1} A_{j+1}^n}{\Delta t} = \frac{q_{j,j+1}^{n+1} + q_{j,j+1}^n}{2} \dots\dots (15)$$

$$A_{j+1}^{n+1} = \alpha (Q_{j+1}^{n+1})^\beta \text{ 또는 } A_{j+1}^n = \alpha (Q_{j+1}^n)^\beta \dots\dots (16)$$

여기서 j는 流出水의 이동경로를 여러개로 분할했을 때의 한 부분을, n은 시간대를 나타내는 지표이다. (16)식을 (15)식에 대입하여 정리하면 다

음과 같은 非線型式이 된다.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{j+1}^{n+1} + \alpha (Q_{j+1}^{n+1})^\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_j^{n+1} + \alpha (Q_j^{n+1})^\beta + \Delta t \cdot \frac{q_{t,j+1}^{n+1} + q_{t,j+1}^n}{2} \dots \dots \dots (17)$$

(17) 식을 陰函數의 非線型解法으로 해석하여 j+1번째 공간에서의 n+1번째 시간대의 流量으로 계산하였다.

한편 非線型解法의 수렴과정은 많은 반복계산을 필요로 하므로, 계산의 효율을 높이기 위해서는 적절한 초기치의 선정이 필요하다. (7) 식을 Q에 대해 미분하고 이를 (6) 식에 대입한 후 有限差分式으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{j+1}^n + Q_j^{n+1}}{2} \right)^{\beta-1} \cdot \frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta t} = \frac{1}{2} (q_{t,j+1}^{n+1} + q_{t,j+1}^n) \dots \dots \dots (18)$$

(18) 식은 線型式이므로 Q_{j+1}^{n+1} 을 간단히 계산하여 非線型解法의 초기치로 선택하면 x, t에 관계없이 조건없는 解의 수렴이 보장된다.

흐름저항의 함수로 표현되는 α, β 는 (8), (9) 식을 (7) 식에 대입하여 계산하였으며, (9) 식의 a와 b는 다시 유수단면의 형태와 조도에 따른 저항계수의 함수로써, Berryman¹¹⁾은 실험을 통해 流水斷面 형태에 다른 抵抗係數 ϕ_b 는 5.8~11.0, 粗度에 따른 저항계수 ϕ_g 는 16~30이 되는 것으로 밝혔으나, 본 모형에서는 이를 補正係數로 취급하였다.

2. 電算프로그램의 開發

각 水文過程을 지배하는 數式알고리즘들을 FORTRAN-77프로그램言語로써 電算프로그램化 하였다. 이 과정에서 고려된 사항들은 다음과 같다.

가. 追跡時間의 길이와 空間의 分割은 모형사용자가 임의로 결정하여, 計算所要時間과 模擬發生 正確度를 임의로 조절할 수 있도록 하였다.

나. 각 水文過程과 數值解釋過程을 별도의 副프로그램으로 작성하여 內容의 추적이 용이하고, 水文學 및 數學的 解釋理論이 진보함에 따라 부분적인 개정이 용이하도록 하였다.

다. 地形과 土壤, 土地利用이 비교적 균일한 부분들을 묶어 全體流域을 다수의 分割區域으로 나

누고, 각 分割區域에서 독립적으로 유출현상을 해석하도록 하였다.

라. 각 분할구역은 地表流成分과 水路成分으로 分類하였으며, 上流側 分割區域의 流出水가 下流側 分割區域의 流入水로 취급되도록 하고, 流出의 진행방향에 따라 순서대로 계산하여 最末端 分割區域의 流出이 全體流域의 그 시간대 流出量이 되도록 하였다.

3. 模型의 構成

SNUA流域水文模型은 資料의 入出力과 變換 및 全體프로그램의 흐름을 제어하는 1개의 主 프로그램과 6개의 副프로그램으로 構成되어 있으며, 그 흐름도는 Fig. 1과 같고 각 단위프로그램의 기능은 Table-2에서와 같다.

模型으로의 入力資料는 크게 두가지로 나눌 수 있으며, 각각 별도의 화일로 취급된다. 첫번째 화일에서는 模擬發生調節과 초기치 파라메타, 節點 降雨資料와 같은 暴雨마다 가변적일 수 있는 資料들이 포함되며, 두번째 화일에는 流域과라 메타인 (1) 일반유역특성, (2) 지형, (3) 식생, (4) 토양, (5) 유출추적순서 등의 資料들이 포함된다. 각 변수들의 내용과 단위는 Table-3에 설명되어 있다.

出力內容은 入力파라메타의 再出力과 流域 最末端에서의 시간대별 模擬發生流出率이 포함되어 있다.

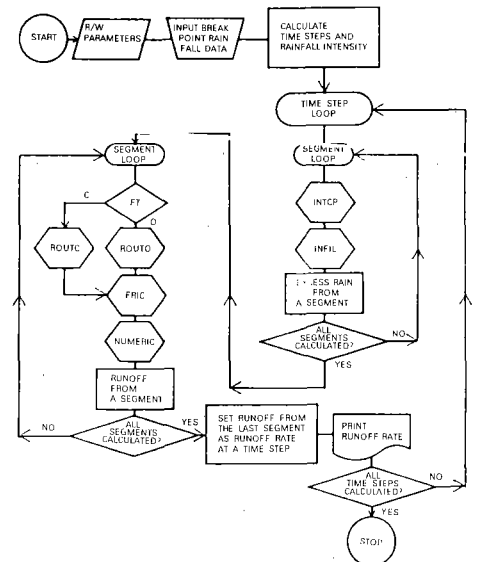


Fig. 1. Flow chart of the SNUA Model.

Table-2. Main and subroutine programs and their functions.

Program name	Function
SNUA	main program that reads and writes all the input data, calls subroutines and prints computed results
FRICT	calculates the friction coefficients according to the particle sizes of soils, channel shape and canopy cover density
INFIL	calculates the volumes of accumulated infiltration and excess rainfall rates of each segment continuously
INTCP	calculates interception storages and net rainfalls of each segments continuously
NUMERIC	solves the continuous equation and partial differential equation of momentum equation
ROUTO	calculates the runoff rates from surface flow segments
ROUTC	calculates the runoff rates from channel flow segments or paddy segments

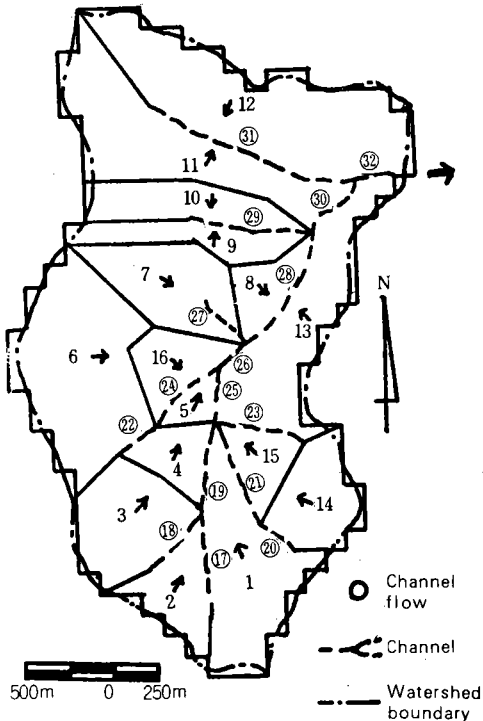


Fig. 2. Segmentation of Dochuck watershed

Table-3. Basic input parameters and data required by SNUA Model for hydrologic simulation.

Classification	Variable name	Parameter Description	unit	
General Watershed Parameters	TITLE	Identification of watershed		
	SEGN	Number of total segments		
	AREA FK1-FK3	Total area of watershed Flow resistance factors	km ²	
Geometry Parameters	SAREA, SLEN, SLOPE, FT	Area, slope length and mean slope of each segment Flow type	km ² m %	
	XIC, XIO	Bed form and ground cover resistance descriptors		
	Interception Parameters	GCD, VOG, SRC, VOR, CND	Vegetation data	
		RETD	Maximum ponding storage	mm
Soil Parameters	HYDK	hydraulic conductivity	mm/hr	
	SAV	Potential capillary tension	mm	
	POROS	Porosity of soil		
	TOPD	Top soil depth	mm	
Routing Parameters	ILAT, IUP	Segment numbers that supply lateral and upstream flow respectively		
Simulation Control Parameters*	IPRT	Index for printing input data		
	DX	Number of space division in a segment		
	DT	Routing time increment	hr.	
	TOLER, XMAX	Convergence limit and max. number of iteration		
	TLIM	Duration for printing hydrograph	hr.	
	Initial Values and Calibration Parameters*	AMC	Initial soil moisture percent to total porosity	
ACF		Constant representing the reduction of HYDK		
EVAP VIN		Pan evaporation Initial interception storage	mm	
Break Point Precipitation Data*	YEAR, MON, DAY, HOU R, MIN	Date and time of each break point in 2 digits		
	RAIN	Rain increment from previous break point	mm	

*included in the file of precipitation data

IV. 模型의 適用性 檢討

1. 파라메타의 결정

경기도 광주군의 도척유역을 試驗流域으로 하여 SNUA流域水文模型의 적용성을 試驗하였다. 도

척유역은 면적이 5,89km²이고, 서울大 農科大學의 中部演習林內에 위치하고 있는 전형적인 山地小流域으로써, 이 유역의 地形圖와 土壤圖 및 說明書와 現地에서의 調查資料를 이용하여 다음과 같이 SNUA流域水文模型의 入力파라메타들을 결정하였다.

가. 地形 및 土壤파라메타

土壤圖와 地形圖를 바탕으로 유역을 분할한 결과는 Fig. 2와 같고, 각 분할구역의 번호는 地形에 따라 중력과 연속의 법칙이 성립되도록 상류로 부

터 하류측 방향으로 부여하므로써 상류측 流出量이 하류측 분할구역의 流入量이 되도록 水文計算의 순서를 정하였다. 한편 각 분할구역별 地形과 土壤파라메타는 Table-4와 같이 결정되었다.

나. 植生 및 抵抗파라메타

植生파라메타는 植生圖와 현장관측의 경험을 토대로 主觀的인 판단을 했거나, Horton¹⁶⁾등의 연구결과로 부터 결정하였다. 植生과 地表被覆의 密度 CND, GND는 0.8~1.0, 遮斷貯留能 VOG와 SRG는 각각 2.5, 10.0, 투영면적에 대한 실제 증

Table-4. Geometry of Dochuk watershed.

Seg.	Length	Slope	Wetted Perimeter-Flow Area Relation		Hydraulic Conductivity	Effective Capillary	Flow Type
			AC	BC			
SEGN	SLEN (m)	SLOPE			HYDK (mm/hr)	SAV (mm)	FT
1	270	.2946	1.00	0.00	3.120	251.0	O. F.
2	232	.3714	1.00	0.00	1.680	251.0	O. F.
3	138	.4643	1.00	0.00	2.000	251.0	O. F.
4	107	.2769	1.00	0.00	5.700	251.0	O. F.
5	112	.2167	1.00	0.00	4.130	251.0	O. F.
6	806	.2370	1.00	0.00	4.560	251.0	O. F.
7	391	.3285	1.00	0.00	5.300	259.0	O. F.
8	176	.2200	1.00	0.00	6.000	240.0	O. F.
9	256	.2508	1.00	0.00	5.200	224.0	O. F.
10	375	.2640	1.00	0.00	4.420	251.0	O. F.
11	259	.2297	1.00	0.00	2.880	251.0	O. F.
12	473	.1932	1.00	0.00	3.600	251.0	O. F.
13	266	.1200	1.00	0.00	6.000	230.0	O. F.
14	193	.3760	1.00	0.00	1.200	251.0	O. F.
15	109	.1643	1.00	0.00	6.000	251.0	O. F.
16	238	.1600	1.00	0.00	5.900	253.0	O. F.
17	625	.2480	0.50	0.50	-	-	C. F.
18	350	.3714	0.50	0.50	-	-	C. F.
19	500	.1400	0.50	0.50	-	-	C. F.
20	215	.4651	0.50	0.50	-	-	C. F.
21	685	.1679	0.50	0.50	-	-	C. F.
22	250	.2000	0.50	0.50	-	-	C. F.
23	600	.2038	0.50	0.50	-	-	C. F.
24	560	.1339	0.50	0.50	-	-	C. F.
25	275	.0364	0.70	0.40	-	-	C. F.
26	175	.0571	0.70	0.40	-	-	C. F.
27	500	.0900	0.50	0.50	-	-	C. F.
28	750	.0267	0.70	0.40	-	-	C. F.
29	750	.1933	0.50	0.50	-	-	C. F.
30	425	.0235	1.00	0.39	-	-	C. F.
31	1625	.1692	0.50	0.50	-	-	C. F.
32	275	.0218	2.00	0.25	-	-	C. F.

Note : O. F. is overland flow ; C. F. is channel flow

Table-5. Description of selected storms for SNUA Model verification.

Storm No.	Date of occurrence	Total Rainfall (mm)	Duration (hr)	Mean Rain Intensity (mm/hr)
1	1985. 8. 10 - 1985. 8. 11	87.5	35	2.5
2	1985. 10. 10 - 1985. 10. 11	104.3	28	3.7
3	1985. 10. 12 - 1985. 10. 13	113.1	9	12.6
4	1986. 7. 24 - 1986. 7. 25	68.0	7	9.7
5	1987. 7. 21 - 1987. 7. 22	225.7	28	8.1

발편의 면적비 VOR는 5.0, 地表貯留能 RETD는 0.0mm로 하였다.

흐름저항파라메타는 Berryman^{(11), (21)} 등이 실험을 통해 밝힌 값들로부터 FK1, FK2, FK3는 40.0, 0.5, 0.04로, XIO와 XIC는 11과 30으로 결정하였으나 이중 XIO, XIC는 보정과정에서 조정하기로 하였다.

다. 暴雨의 選定

SNUA流域水文模型의 補正과 檢定을 위해 선정된 폭우들의 개요는 Table-5와 같다.

3. 模型의 補正

SNUA流域水文模型의 補正을 위해 storm 1과 storm 2의 강우자료를 이용 時間別 流出量을 模擬發生시켜 實測値와 비교하였다. storm 1에 대한 최초의 模擬發生結果는 Fig. 3 a)의 RUN 1과 같이

실측유출에 비해 尖頭유량은 크고, 도달시간은 빠르게, 수문곡선의 減水部는 빠르게 나타났다. 저항파라메타인 XIO와 XIC를 보정파라메타로 하여 조정한 결과 급격한 유출이 지연되어 최종적으로 RUN 3과 같은 결과를 얻었다. 실측수문곡선과 모의발생수문곡선의 相關係數 R은 0.988로 나타났으며, storm 2에 대해서도 같은 과정을 거쳐 Fig. 3 b)의 RUN 2와 같이 R이 0.950으로 나타났다. 보정을 통해 XIO와 XIC는 최종적으로 각각 44000, 12000으로 결정되었다.

4. 模型의 檢定

보정을 통해 결정된 XIO와 XIC의 값을 그대로 사용하여 storm 3, storm 4, storm 5에 대해 流出을 模擬發生시켜 實測値와 비교한 결과는 Fig. 4와 같았다.

5. 適用性 考察

SNUA流域水文模型의 適用性 試驗을 통해 모의발생된 水文曲線과 實測値를 대비시켜 분석한 결과는 Table-6에서와 같다.

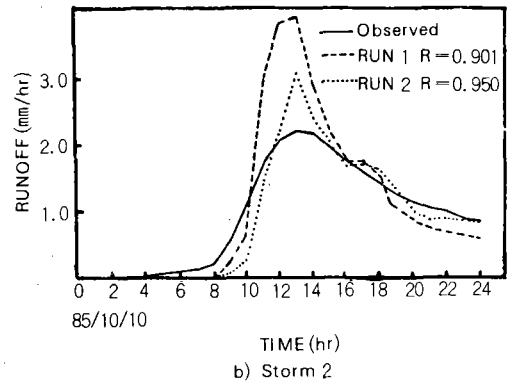
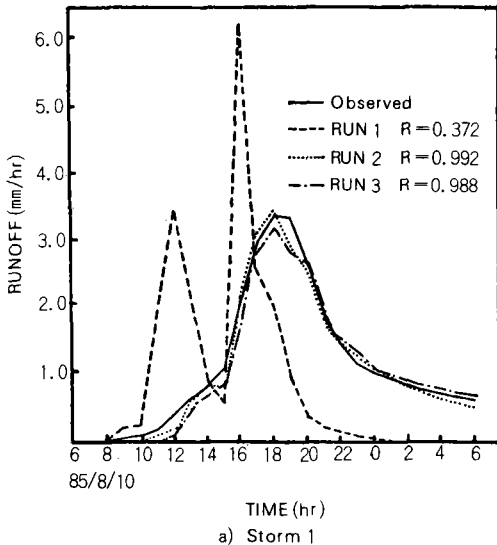


Fig. 3. Comparison between observed and simulated hydrographs for calibration test.

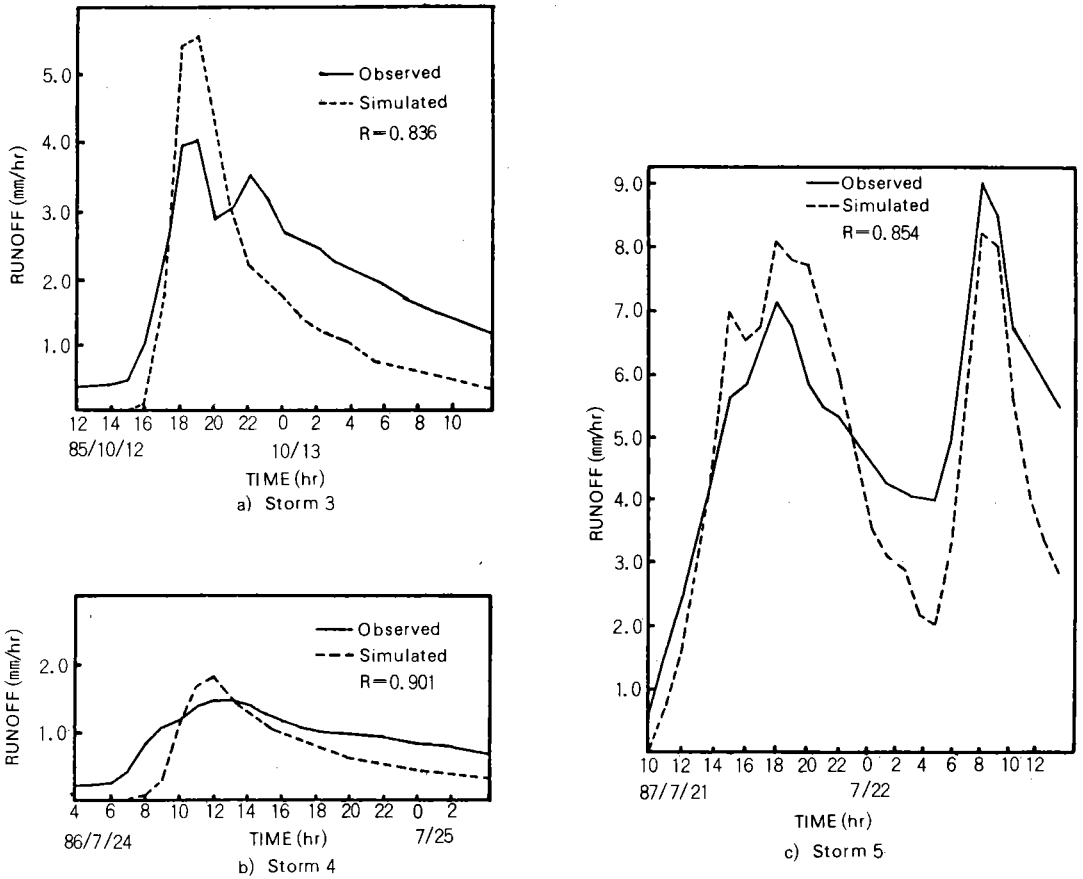


Fig. 4. Comparison between observed and simulated hydrographs for verification test.

Table-6. Observed and simulated runoff volume and peak flow.

Storm No.	Runoff Volume			Peak Flow				r
	OBS. (mm)	SIM. (mm)	Error (%)	OBS. (mm)	SIM. (mm)	Error (%)	Time Lag	
1	27.4	25.5	-6.9	3.372	3.189	-5.4	0	0.988
2	24.5	22.8	-6.9	2.263	3.182	40.6	0	0.950
3	50.9	34.4	-32.0	4.085	5.619	37.6	0	0.841
4	21.9	15.9	-27.4	1.415	1.850	25.4	0	0.901
5	137.5	122.8	-10.7	9.000	8.250	-8.3	0	0.854

침투유출에 있어서 발생시간은 모든 暴雨에 對해 정확히 예측되었으며, 流出量은 상대오차가 전체적으로는 5.4~40.6% 범위로 크게 나타났으나 실제로는 침투유량이 적을수록 큰 상대오차를 보이는 경향이며 storm 5와 같이 큰 유량에서는 상대오

차가 8.3% 정도에 불과하였다.

한편 총유출량에 있어서는 상대오차가 6.9~32% 정도로써 과소산정되는 것으로 나타났으며, 平均降雨強度가 클수록 오차도 크게 나타났다. 산악지대의 경우 표토층이 얇고 경사가 급해 中間流

출의 시작시간이 빨라 地表水流出과의 분리가 용이하지 않으며 위와 같은 오차들은 이런 조건에 기인하는 것으로 생각되어, 앞으로 山地流域에서의 暴雨流出-水文曲線을 豫測하는 模型으로써 中間流出도 함께 고려할 수 있도록 改善을 시도하는 것이 바람직한 것으로 판단되었으며, 또한 流出測定資料가 확보된다면 流域特性이 다른 여러개의 流域에 대해서도 本模型의 適用性을 檢討하여 模型의 改善方向을 모색함이 좋으리라고 생각되었다.

V. 結 論

本 研究에서는 기존의 수문자료가 부족하여 流域水文模型의 適用이 어렵고, 山岳地가 많으며, 土地利用과 土地分布가 다양한 우리나라 山地小流域의 實情에 適合한 暴雨流出豫測을 위한 流域水文模型 SNUA Model을 開發하였으며, 경기도 광주군의 도척 시험유역에서 수집된 暴雨資料를 利用, 模型의 適用性을 檢討하였다.

이 과정에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 暴雨의 流出에 關係되는 水文要素로써 차단, 증발, 침투와 지표수 및 수로흐름등을 기본 이론과 가정에 의해 模型化하였다.
2. 開發된 模型에서 地表面 도달降雨量은 蒸發과 降雨強度가 고려된 遮斷 물수지를 연속적으로 計算함으로써 決定되도록 하였다.
3. 流出의 根源이 되는 초과강우는 地表面 도달降雨量에서 Green & Ampt 式에 의해 算定된 浸透量을 감하여 결정하였다.
4. 地表流 및 水路에서의 흐름은 動水波의 運動量方程式을 적용하여 해석함으로써 流域出口에서의 流出水文曲線이 模擬發生되도록 하였다.
5. 開發된 模型은 하나의 流域을 여러개의 小流域으로 취급하여 流出量을 計算한 후, 그 結果들을 조합하여 유역말단부에서의 流出量을 計算하는 分散型이며, 暴雨時에만 發生하는 地表流만을 취급하는 單期模型이다.
6. 開發된 模型에 의해 模擬發生된 暴雨流出 水文曲線을 實測 水文曲線과 비교하였는 바, 침투유출의 예측은 발생시간에 있어서 정확히 一致하였으며, 양에 있어서는 5.4~40.6%의 상대오차가 있는 것으로 나타났으며, 總流出體積의 모의발생치는 6.9~32%의 상대오차가 있었다.

7. 模型의 模擬發生정확도를 높이기 위해서는 앞으로 他流域에서의 적용시험과 일부수문요소의 추가 등과 같은 研究가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

本 研究는 韓國科學財團의 研究費 支援에 의해 遂行되었음

參 考 文 獻

1. 강영, 1985, 소유역에서 유출량 확정을 위한 유역수문모형의 개발, 서울대학교 대학원 석사학위논문
2. 권순국, 1983, 소유역의 유출 예측을 위한 수학적 모의발생모형, 농학연구 8(2) : 11-19, 서울대학교 농과대학
3. 권순국, 고덕구, 1987, 산지 유역에 대한 USDAHL-74 유역수문모형의 장기유출해석 적용, 한국농공학회지 29(2) : 53-63
4. 김현영, 박승우, 1986, 유역특성에 따른 탱크 모형 매개변수의 변화, 한국농공학회지 28(2) : 42-52
5. 박성우, 권순국의 4인, 1984, 응용수문학, 향문사
6. 서울농대부속 농업개발연구소, 1984, 농업용수개발시험 연구보고서(III) : 13-73, 농수산부, 농업진흥공사
7. 서울농대부속 농업개발연구소, 1985, 유출량 추정 전산모형개발(I), 농수산부, 농업진흥공사
8. 서울농대부속 농업개발연구소, 1986, 유출량 추정 전산모형개발(II), 농수산부, 농업진흥공사
9. 이상만, 1986, 농업소유역에서 홍수량 산정을 위한 전산수문모형의 개발, 서울대학교 대학원 석사학위논문
10. ASAE, 1982, Hydrologic Modeling of Small Watershed, An ASAE Monograph No. 5.
11. Berryman, A. D., 1974, Hydrologic Characteristics of a Small Basin, M. S. Thesis, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
12. Brakensiek, D. L., 1977, Estimating the Effective Capillary Pressure in the Green and Ampt Infiltration Equation, Water

- Resources Reserch, Vol. 13, No. 3 : 680-682.
13. Brakensiek, D. L. and C. Onstard, 1977, Parameter Estimation of the Green and Ampt Infiltration Equation, Water Resources Reserch, Vol. 13, No. 6 : 1009-1012.
 14. Chu, S. T., 1978, Infiltration During an Unsteady Rain, Water Resources Research, Vol. 14, No. 3 : 461-466.
 15. Green, W. A. and G. A. Ampt, 1911, Studies on Soil Physis : 1. The Flow of Air and Water thru Soils, Jorunal of Agricultural Science, Vol. 4 : 1-24.
 16. Horton, R. E., 1919, Rainfall Interception, Monthly Weather Review, No. 47 : 603-623.
 17. Li, R. M., 1974, Mathematical Modeling of Response from Small Watershed, Ph. D. Dissertation, Department of Agricultural Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
 18. Li, R. M., M. A. Stevens and D. B. Sinons, 1976, Solutions to Green-Ampt Infiltration Equation, Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 102, IR2 : 239-248.
 19. Mein, R. G. and C. L. Larson, 1973, Modeling Infiltration During a Steady Rain, Water Resources Research, Vol. 8, No. 2 : 384-394.
 20. Mein, R. G. and D. A. Farrell, 1974, Determination of Wetting Front Suction in the Green and Ampt Equation, Soil Science Society American Proceedings, Vol. 38 : 372- 376.
 21. Streeter, V. L. and E. B. Wylie, 1975, Fluid Mechanics, 6th edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
 22. Swartzendruber, D., 1974, Infiltration of Constant Flow Rainfall into Soil as Analyzed by the Approach of Green and Ampt, Soil Science, Vol. 117 : 272-281.
 23. U. S, Soil Conservation Service, 1971, National Engineering Handbook Notice 4-101.