

小流域 流出解析을 위한 有限要素模型의 開發

Development of Finite Element Model for Storm Runoff from Small Watersheds

崔 珍 奎* · 朴 承 禹**
Choi, Jin Kyu · Park, Seung Woo

Summary

The objectives of this study are to develop a deterministic, distributed, and event - oriented hydrologic watershed model and to test the applicabilities of the model to small watersheds. The resulting model SRAFEM, Storm Runoff Analysis by Finite Element Method, is capable of simulating storm runoff from small watersheds using two - dimensional overland flow and one - dimensional channel flow components by kinematic approximations and finite element method.

Two small watersheds were selected and the applicability of the model was tested. The test results showed that the mean simulation errors for runoff volume and peak flow were 13.9% and 19.1% for Yeonwha watershed. They were 42.8% and 8.0% for Banweol watershed, respectively.

I. 緒 論

小流域에서 流出容積, 尖頭流量 및 尖頭發生時間 등의 水水量을 정확히 豫測하는 일은 治水 및 利水面에서 볼때 대단히 重要하다.²⁰⁾ 특히 많은 降雨가 있을 때의 短期 洪水流出解析은 貯水池의 餘水吐, 臨時물막이, 河川堤防, 暗渠 등의 水工構造物 設計와 施工에 필수적이며,

農耕地나 低濕地 등의 피해를 줄일 수 있는 대책을 樹立하는 데도 크게 利用된다.¹⁷⁾

그러나 小流域에서의 洪水量을 推定하기 위해서는 降雨 및 流出資料가 필요하지만, 대부분의 小流域은 實測資料가 없는 無計測流域이므로 적절한 方法을 利用하여 推定해야 하는데 이러한 경우 流域內의 水文現象을 보다 正確히 解析할 수 있고, 좀더 一般的으로 適用할 수 있는

* 全北大學校 農科大學

** 서울大學校 農科大學

키워드 : 流域水文模型, 流出解析, 動水波理論, 有限要素法, 土地利用

物理的 媒介變數를 利用하는 水文模型이나 數學的 技法이 適用性이 높은 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾

한편 數學的 水文模型은 正確性和 應用性을 높이기 위해 降雨 및 環境要素 入力에 있어서는 媒介變數를 포함하는 分布形 模型의 特性을 갖게 된다.¹⁾ 그리고 小流域의 水文現象이 갖는 特性으로서 地表面 流出的 機作(mechanism)과 河川流出的 舉動解析을 위해서는 보통 한 方向으로의 흐름을 가정한 1차원 模型과 근사적 數值解法의 일종인 有限差分法을 많이 利用하고 있다.

1차원적 解析과 有限差分法에 의한 模型은 數學的 解가 비교적 간단하기는 하여 計算的 努力이 적게 소요되는 長點을 지닌 반면, 실제 流域에서의 水文現象의 精確한 再現에 있어 流域의 크기나 特性에 따라서 1차원으로는 實世界를 精確히 나타내기가 어려우며,^{2,4,8)} 有限差分法은 數值解析상 距離 및 計算時間 間隔에 따른 制限性과 流域의 形態를 空間的으로 표현하기는 다소 부족한 面이 있다.²²⁾ 이와 같은 制限性을 줄이기 위하여 數值解析方法의 하나인 有限要素法의 適用이 증가하고 있다.^{11,13,22)}

그러나 水理 및 水文分野에서의 有限要素法의 適用은 河口나 沿海, 江, 河川 등에서는 비교적 많이 이루어지고 있지만,^{9,10,19)} 流域에서의 流出解析에 適用된 例는 Jayawardena와 White(1977)⁶⁾, Ross(1978)¹²⁾ 등의 研究에 불과하다.

본 研究에서는 小流域에서의 短期 流出解析을 위하여 流域의 土壤, 土地利用 등을 媒介變數로 처리하는 分布形 模型의 特性을 前提로 流域의 形狀을 三角網法으로 構成하고, 2차원 地表面 흐름과 1차원 水路흐름의 近似式을 基本으로 하여 有限要素 數值解法을 適用한 小流域 流出模型을 開發하고, 蓮花川流域과 半月流域을 對象流域으로 選定하여 模型의 補正 및 檢定을 실시함으로써 본 模型의 適用性을 檢討하였다.

II. 模型의 開發

1. 흐름의 基本方程式

가. 地表面 흐름

地表面흐름은 2차원 連續 및 運動量方程式을 簡略化한 式(1), (2) 및 (3)을 基本方程式으로 사용하였다.

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

$$p = \frac{1}{n} R^{2/3} S_{ox}^{1/2} h \dots\dots\dots(2)$$

$$q = \frac{1}{n} R^{2/3} S_{oy}^{1/2} h \dots\dots\dots(3)$$

여기서 u, v는 각각 x, y 方向의 流速成分, h는 水深, t는 時間, r는 降雨로 인한 超過雨量, S_{ox}, S_{oy} 및 p, q는 각각 x, y 方向의 地表面傾斜와 流量, R과 n는 動水半徑과 Manning의 粗度係數이다.

나. 水路 흐름

水路의 흐름은 1次元 連續方程式(4)와 運動量方程式에 動水波理論을 適用하여 簡略化한 式(5)를 사용하였다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots\dots\dots(4)$$

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S_c^{1/2} A \dots\dots\dots(5)$$

여기서 A는 流水 斷面積, Q는 流量, q는 地表面으로부터의 橫流入量, S_c는 水路바닥傾斜이다.

2. 流域 水文過程

가. 流域의 表示

流域의 表示方法은 地形을 비교적 忠實하게 나타낼 수 있고, 特定領域의 크기를 조절할 수 있음은 물론 河川, 道路 등의 線形態와 特정한 點과의 연관性이 뛰어난 三角網法을 사용하였

다. ^{5,7)}

나. 浸透量

土壤의 浸透率에 따른 要素內의 超過雨量 算定에 水文應答單位(Hydrologic Response Unit ; HRU)를 도입하였는데, 이 HRU는 土壤, 土地利用 等 流出에 미치는 異質的인 特性이 같은 單位로 正義된다.¹²⁾ 이때 浸透量方程式은 Holtan 式(6)을 이용하였으며 蒸發散, 中間遮斷 및 地面貯溜 등은 고려하지 않았다.

$$f = aS^n + f_c \dots\dots\dots(6)$$

여기서 f는 浸透率, a는 피복조건에 따른 指數, S는 地表土層에서의 浸透可能水分量으로 비층만 貯留공간, f_c는 終期 浸透率, n는 土壤의 水理 特性에 따른 係數이다.

다. 初期 및 境界條件

初期條件은 降雨가 시작되기전 地表面과 水路는 乾燥한 상태이고, 境界條件은 모든 時間에 있어서 各 要素의 最上端 境界點에서의 흐름은 零으로 假定하였다.^{2,12)}

3. 有限要素 解析

가. 地表面 흐름

地表面 要素의 形態는 各 邊이 直線이고 꼭 지점에서만 節點을 갖는 3節點 三角形要素를 선택하였으며, 基本方程式(1), (2) 및 (3)을 풀어서 구하고자 하는 場變數(field variable)는 空間 x, y와 時間 t에 從屬인 水深 h 및 x, y方向의 流速成分 u, v 등으로 이 3개 變數에 補間函數 N_i를 使用하여 近似的으로 表示하면 다음과 같다.

$$h^* = N_1h_1 + N_2h_2 + N_3h_3 \dots\dots\dots(7)$$

$$u^* = N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3 \dots\dots\dots(8)$$

$$v^* = N_1v_1 + N_2v_2 + N_3v_3 \dots\dots\dots(9)$$

또한 x, y 方向의 流量成分 p, q는 式(10) 및 (11)과 같이 위의 變數들의 곱으로 이루어진다.

$$p^* = N_1p_1 + N_2p_2 + N_3p_3 \dots\dots\dots(10)$$

$$q^* = N_1q_1 + N_2q_2 + N_3q_3 \dots\dots\dots(11)$$

한편 補間函數로 나타낸 變數들을 連續方程式에 代入하여 한 要素에 Galerkin 殘差法을 適用하면 다음과 같다.

$$\int_A \left[\frac{\partial h^*}{\partial t} + \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial q^*}{\partial y} - r \right] N_i \, dA = 0$$

(for i=1,2,3) \dots\dots\dots(12)

위 式(12)에 Green 定理를 利用하여 積分하고 流域의 境界에서 流入 및 流出이 없는 것으로 假定하면 다음과 같은 形態의 要素方程式을 얻게 된다.

$$[M_1]\{h\} + [M_2]\{p\} + [M_3]\{q\} - [M_4]r = 0 \dots\dots(13)$$

여기서 [M₁]은 時間微分項의 係數行列, [M₂], [M₃] 및 [M₄]는 各 各 時間微分項을 包含하지 않는 項이다. 式(13)에서 微分形態로 포함된 水深 項을 간단한 1차 陽函數形態를 使用하고 全流域에 걸쳐 組合하면 全體 시스템方程式이 構成된다.

나. 水路 흐름

水路흐름의 基本式인 (4) 및 (5)의 解를 구하기 위하여 節點에서의 未知量 A, Q는 各 要素에서 x方向으로 分布된다고 假定하고, 한 要素와 2個 節點사이의 關係를 1次函數로 나타내면 다음과 같다.

$$A^*(x, t) = N_1A_1 + N_2A_2 \dots\dots\dots(14)$$

$$Q^*(x, t) = N_1Q_1 + N_2Q_2 \dots\dots\dots(15)$$

또한 節點 1,2에서의 橫流入量 q는 다음과 같다.

$$q^*(x, t) = N_1q_1 + N_2q_2 \dots\dots\dots(16)$$

여기서 한 要素에 有限 要素法을 適用하여 積分하면 式(17)과 같은 簡略한 形態로 表示할 수 있다.

$$l[K] \{A\} + [L] \{Q\} - l[K] \{q\} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

여기서 l 는 주어진 要素의 길이이다. 한편 流水面積에 대한 時間微分項은 2段階 陽函數 形態를 이용하여 나타내고, 最終的으로 式(17)을 組合하면 水路 全體 節點數의 크기에 맞는 要素行列式이 만들어진다.

4. SRAFEM 模型

小流域에서의 降雨에 의한 直接 水文流出量을 模擬發生시키기 위한 水文模型을 프로그램化하고 이를 SRAFEM (Storm Runoff Analysis by Finite Element Method)이라고 하였다. SRAFEM 模型은 1개의 主프로그램과 9개의 部프로그램으로 構成하였으며, 模型에 필요한 入力資料는 模擬發生 調節情報, 強雨資料, 流域要素의 構成, HRU 特性, 計算時間增分 및 模擬發生時間 등이고 模型으로부터 出力되는 資料는 流域의 構成, 地表面 및 水路의 幾何資料, HRU 및 要素별 超過雨量, 각 節點별 地表面 및 水路의 流量등이다.

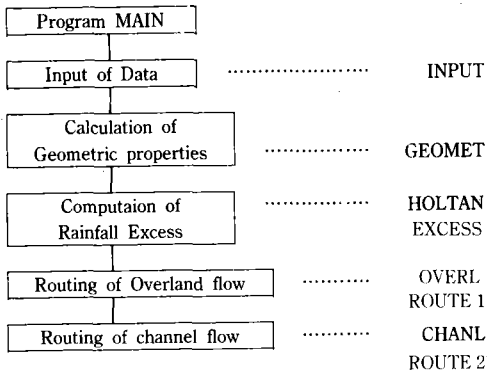


Fig. 1. Flow chart for SRAFEM Model.

III. 模型의 適用

1. 對象流域

本 模型의 適用性을 檢討하기 위하여 流域面積 2.788km²의 全州市 蓮花川流域과 2.70km²의 京畿道 半月流域을 對象流域으로 選定하였다.

가. 流域特性

蓮花川流域과 半月流域의 地相의 因子는 Table - 1과 같다.

蓮花川流域의 土壤은 壤土 및 砂壤土, 半月流域의 土壤은 比較적 浸透率이 낮은 丘陵地와 低丘陵地의 土壤群으로 砂壤土, 자갈 또는 잔돌이 있는 讓土, 일반 讓土로 構成되어 있다.^{16,18)}

土地利用은 蓮花川流域이 山林地 45.91%, 住居地 28.23%, 유휴지 9.45%, 果樹園 6.95%, 畚 5.57%, 잔디 3.80%로 構成되어 있고, 半月流域은 山林地 40%, 畚 30%, 기타 30%로 蓮花川流域에 比하여 山林地는 비슷한 반면 農耕地가 많은 편이다.

나. 降雨 및 流出資料

模型에 使用된 蓮花川流域의 降雨資料는 11개의 降雨事象을 選定하였으며, 流出量資料는 水位 및 流速測定 資料를 가지고 回歸分析을 실시하여 Table - 2에 整理된 바와 같은 水位-流量關係式을 가지고 實測水文曲線을 算定하였다.

Table - 2. Regression analysis for water level - discharge curve.

Discharge equation	Correlation coefficient	F - value
$Q = 7.03(H - 26.589)^2$	0.86	14.66

Table - 1. Characteristics of two watersheds.

Watershed name	Watershed area(ha)	Stream length(km)	Shape factor	Mean slope of stream	Maximum relief(m)	Relief ratio
Yeonwha	278.8	2.58	0.419	0.011	94.1	0.043
Banweol	270.0	3.83	0.190	0.014	81.4	0.021

한편 半月流域에 사용된 水文資料는 1986년도 8개의 降雨와 서울大學校 農工學科에서 流速測定하여 算出된 流出資料를 사용하였다.

다. 流域의 分割

模型을 적용하기 위한 流域의 分割은 地形的인 면을 고려하여 蓮花川流域은 84個의 三角形 地表面 要素와 20개의 水路要素로 나누었고, 半月流域은 地形이 長方形으로 비교적 단순하여 35개의 地表面 要素와 9개의 水路要素로 分割하였다.²³⁾

2. 媒介變數의 補正

가. 先行土壤水分條件

初期含水量의 決定은 先行降水量에 따라 先行土壤水分條件을 나타내는 變數 ASMC를 가 정하고, 模擬發生結果에 따라 流出容積의 平均 제곱근誤差(Root - Mean - Squares ; RMS)를 계 산하여 RMS가 작은 ASMC값이 되도록 補正하 였다.

蓮花川流域의 경우 反復法을 이용하여 결정된 先行土壤水分條件은 Table - 3과 같다.

한편 半月流域에서의 ASMC도 蓮花川流域과 마찬가지로 方法으로 補正하였으며, Table - 4는

Table - 3. Comparison of expected and calibrated ASMC for Yeonwha watershed.

Storm event	Rain-fall (mm)	Expected		Calibrated	
		ASMC(%)	RMS	ASMC(%)	RMS
5/ 3/88	10.7	25	1.0955	23	0.3405
5/ 7/88	39.2	30	7.4060	25	2.6120
7/26/88	26.2	92	2.1235	90	1.6324
9/ 2/88	10.9	95	0.9652	90	0.4684
9/10/88	24.2	30	4.2454	25	1.2022

Table - 4. Calibrated ASMC for Banweol watershed.

Storm event	7/11	7/16	7/18	7/24	7/26	8/11	8/13	8/20
Rainfall(mm)	43.8	43.2	25.3	24.1	13.8	69.5	27.9	22.5
ASMC(%)	50	52	98	77	97	50	96	60

Table - 5. Holtan's a and Manning's n used for Banweol watershed.

Coeffi-cient	Paddy	Upland	Resi-dential	Woods
Holtan's a	0.80~0.95	0.60~0.85	0.40~0.65	0.80~0.95
Manning's n	0.10~0.13	0.09~0.12	0.07~0.11	0.17~0.21

Table - 6. Characteristics of HRU for Banweol watershed.

HRU No.	Land use	FAW (cm/cm)	FGW (cm/cm)	F _c (cm/hr)	Soil depth (cm)
1	Paddy	0.213	0.166	0.391	11.05
2	Upland	0.213	0.166	0.391	11.05
3	Residential	0.213	0.166	0.391	11.05
4	Woods	0.213	0.166	0.391	11.05
5	Paddy	0.210	0.165	0.371	11.13
6	Upland	0.210	0.165	0.371	11.13
7	Woods	0.210	0.165	0.371	11.13
8	Paddy	0.216	0.164	0.384	11.10
9	Upland	0.216	0.164	0.384	11.10
10	Residential	0.216	0.164	0.384	11.10
11	Woods	0.216	0.164	0.384	11.10

最終的으로 결정된 ASMC 값을 나타낸 것이다.

나. 水文應答單位

模型에 사용된 蓮花川流域과 半月流域의 HRU는 土壤과 土地利用을 組合하여 각각 11種 類로 分類하고 각 HRU 별 媒介變數 값은 먼저 參考文獻^{3, 12, 14, 16, 17.}에 의한 값을 취한 후 反復法을 利用하여 결정하였다.^{21, 23)}

3. 模型의 檢定

가. 蓮花川流域

模型의 補正을 통하여 결정된 媒介變數 값을 1989년 降雨資料에 적용하여 模擬發生시키고

觀測된 水文曲線과 模擬發生水文曲線의 結果를 比較하였는데 이때 計算時間增分은 地表面 150 sec, 水路 50sec를 使用하였다.

Fig. 2에서 Fig. 7까지는 각 降雨時의 觀測 流量과 SRAFEM 模型으로 模擬發生시킨 水文 曲線을 나타낸 것이며 Table-7은 이를 要約한 것이다.

Table-7의 結果를 보면 觀測流出容積과 模擬 發生된 流出容積과의 誤差는 0-38.7% 尖頭流 量誤差는 10.4-38.8% 이었다. 특히 5월 11일, 7월 8일의 流出容積誤差는 각각 0.0% 및 2.7% 로서 거의 정확하게 模擬發生시킨 반면, 尖頭 流量에서는 16.3%, 17.5%의 誤差를 가져왔다. 또한 6월 4일의 경우 尖頭時間은 정확히 일치 시켰으나 流出容積과 尖頭流量에서 각각 38.7% 및 18.6%의 많은 誤差가 발생되었고, 尖頭時間 에서는 6월/4일의 경우에 일치되었을 뿐 4월 14 일은 15분, 5월 11일은 45분, 7월 8일은 15분

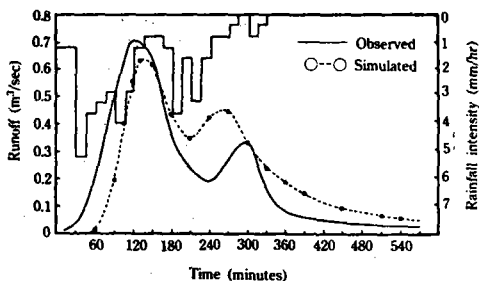


Fig. 2. Observed and simulated hydrographs of Yeonha watershed(4/14/89).

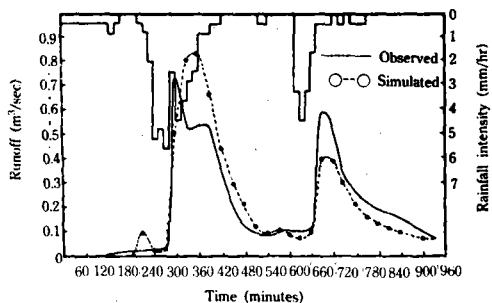


Fig. 3. Observed and simulated hydrographs of Yeonha watershed(5/11/89).

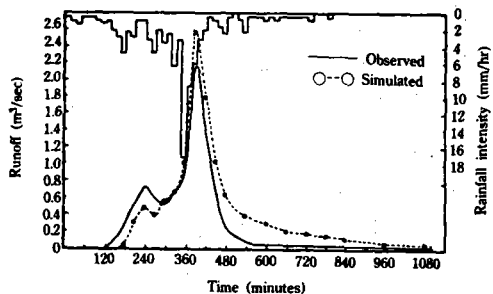


Fig. 4. Observed and simulated hydrographs of Yeonha watershed(6/4/89).

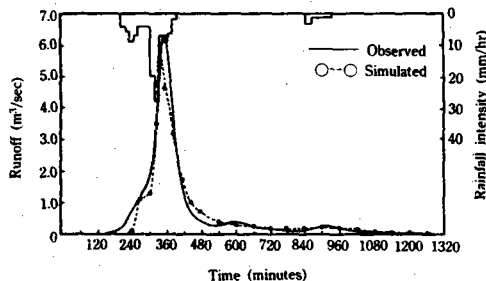


Fig. 5. Observed and simulated hydrographs of Yeonha watershed(6/14/89).

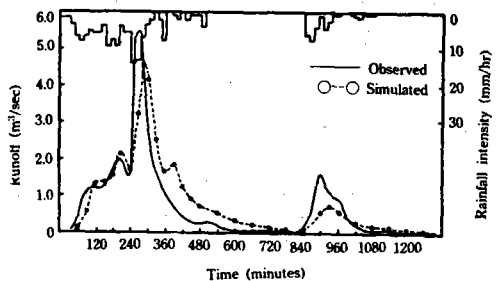


Fig. 6. Observed and simulated hydrographs of Yeonha watershed(7/8/89).

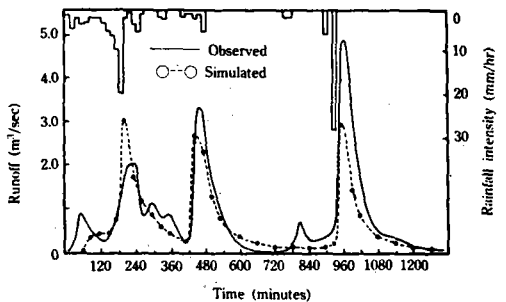


Fig. 7. Observed and simulated hydrographs of Yeonha watershed(7/15/89).

Table - 7. Simulation results of Yeonwha watershed(1989).

Storm event	Rainfall (mm)	Runoff volume(m ³)			Peak flow(m ³ /sec)			Peak time		ASMC (%)
		Obs.	Sim.	Error(%)*	Obs.	Sim.	Error(%)*	Obs.	Sim.	
4/14/89	10.3	7,255	7,868	8.9	0.709	0.635	10.4	18 : 00	18 : 15	32
5/11/89	14.3	11,846	11,792	0.0	0.729	0.848	16.3	06 : 00	06 : 45	47
6/ 4/89	25.4	16,885	23,416	38.7	2.157	2.559	18.6	01 : 30	01 : 30	33
6/14/89	33.1	45,104	39,335	12.8	6.430	5.588	13.1	11 : 30	11 : 15	84
7/ 8/89	47.8	48,114	49,392	2.7	5.532	4.564	17.5	17 : 00	17 : 15	77
7/15/89	33.1	64,312	51,184	20.4	4.961	3.036	38.8	20 : 30	07 : 30	95

*Relative error

늦게 발생된 반면, 6월 4일은 15분 빠르게 模擬發生되었다. 이와같은 誤差는 여러가지 原因이 있겠지만 粗度係數 등 媒介變數가 完全하게 補正되지 않은 결과라고 판단된다.

한편 7월 15일의 降雨에 대한 模擬發生 結果를 보면 水文曲線의 形態는 비슷하다고 볼 수 있으나 流出容積과 尖頭流量에서 각각 20.4% 및 38.8%의 큰 誤差 뿐아니라 尖頭時間에서 13時間의 많은 誤差가 발생하였다. 어느 地形面인 影響과 局部的으로내린 降雨가 본 試驗流域에 설치된 雨量計의 降雨記錄과 降雨의 時間的 分布의 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다.

나. 半月流域

본 水文模型에 半月流域의 降雨資料를 사용하여 模擬發生된 결과는 Fig. 8에서 Fig. 15까지 圖示한 바와 같으며 Table - 8은 이를 要約하여 整理한 것이다.

Table - 8의 結果에서 尖頭流量은 7월 11일, 8월 11일 및 8월 13일에서 각각 11.8%, 12.1% 및 22.1%의 誤差를 나타낸 경우를 제외하고는 나머지가 0.4%~8.8%로서 좋은 結果를 나타냈으며, 全般的인 誤差百分率이 0.4%~22.1%로 比較的 합리성이 있다고 평가된다. 尖頭時間에서는 8월 20일의 경우가 일치한 반면, 8월 11일과 8월 13일의 경우는 각각 23분 및 5분씩 빨랐고, 7월 16일, 7월 18일 및 7월 24일의 경우에는 10분에서 80분까지 늦게 模擬發生되었는데, 이는 降雨量의 資料가 半月流域과 거리가 있는 水原

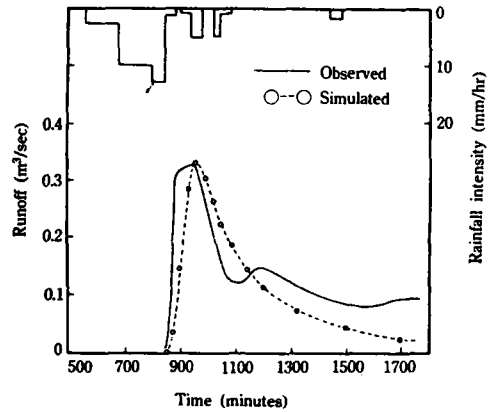


Fig. 8. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(7/11/86).

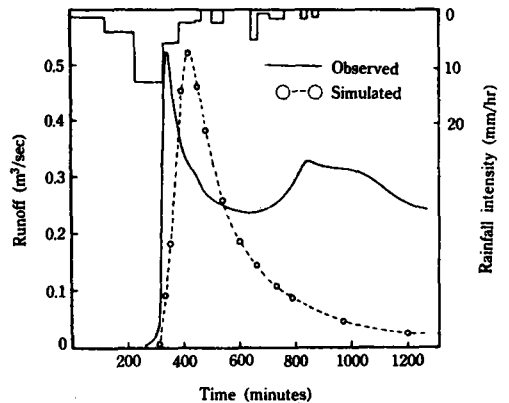


Fig. 9. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(7/16/86).

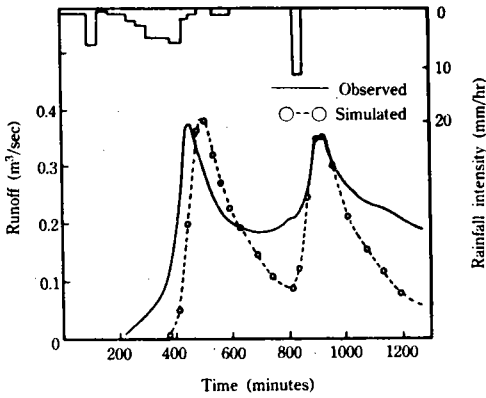


Fig. 10. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(7/18/86).

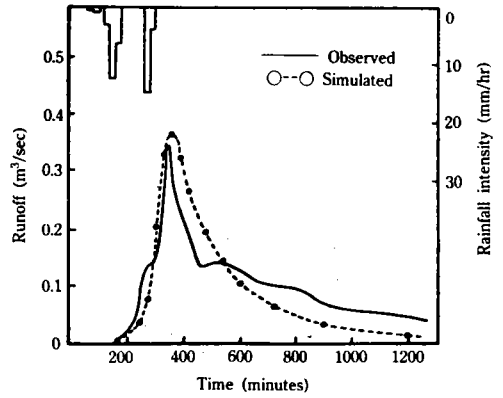


Fig. 12. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(7/26/86).

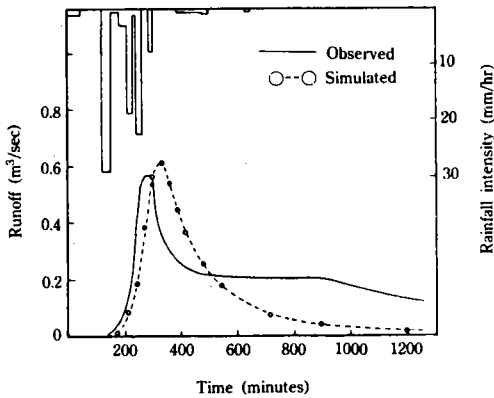


Fig. 11. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(7/24/86).

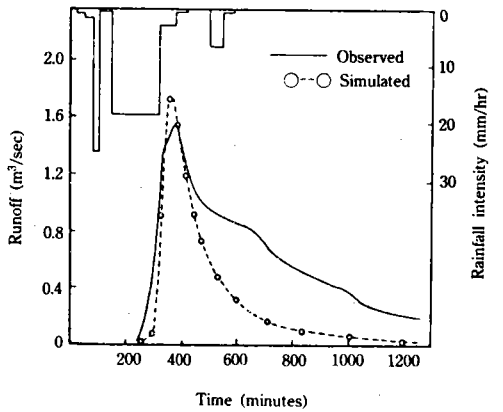


Fig. 13. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(8/11/86).

Table - 8. Simulation results of Banweol watershed(1986).

Storm event	Runoff volume(m ³)			Peak flow(m ³ /sec)			Peak time(min)	
	Obs.	Sim.	Error (%)	Obs.	Sim.	Error (%)	Obs.	Sim.
7/11/86	8.888	6.296	29.2	0.3310	0.3371	11.8	950	960
7/16/86	20.870	8.397	59.8	0.5284	0.5212	1.3	430	420
7/18/86	23.645	11.655	50.7	0.3790	0.3805	0.4	455	510
7/24/86	18.000	10.486	41.7	0.5677	0.6174	8.8	289	330
7/26/86	8.122	6.436	20.8	0.3506	0.3675	4.8	345	360
8/11/86	52.682	21.046	60.1	1.5564	1.6454	12.1	383	360
8/13/86	45.106	31.238	30.7	1.7754	2.1677	22.1	935	930
8/20/86	26.520	13.369	49.6	0.9980	1.0282	3.0	120	120

*Relative error

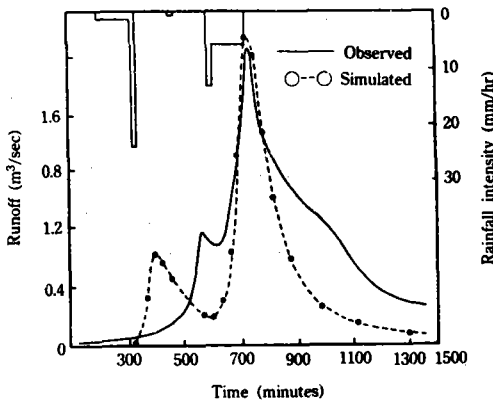


Fig. 14. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(8/13/86).

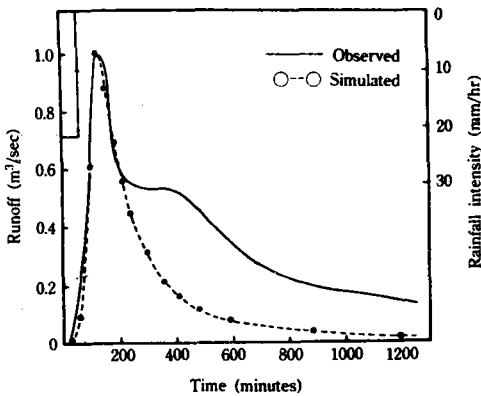


Fig. 15. Observed and simulated hydrographs of Banweol watershed(8/20/86).

測候所의 降雨量을 이용한 때문에 생각된다. 또한 總流出量의 誤差百分率은 20.8~60.1%로 誤差가 크게 나타났고, 특히 減水部에서는 모든 結果가 실측치와 잘 접근하지 못했는데, 이는 浸透率이 비교적 낮은 土壤群으로 이루어진 半月流域의 土壤特性을 媒介變數로 처리하는 프로그램상에서 매 段階마다 補正해주시 못한 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

IV. 結 果

본 研究에서는 小流域의 短期 流出解析을 위

하여 流域을 地表面과 水路로 구분하고, 流域의 幾何的 條件 및 土壤, 土地利用 등의 異質의인 水文特性을 三角網法과 物理的 媒介變數를 利用하여 나타낼 수 있는 確定論的, 分布形 流域 水文模型SRAFEM (Storm Runoff Analysis by Finite Element Method)을 開發하였으며, 對象 流域을 選定하여 實測值와 模擬發生值를 比較 함으로써 本 模型의 適用性을 檢討하였다.

模型의 適用對象인 蓮花川流域과 半月流域의 水文資料를 사용하여 媒介變數를 補正하고 模擬發生시킨 結果, 蓮花川流域의 경우 流出容積은 0~38.7%, 尖頭流量은 10.4~38.8%의 誤差가 발생되었고, 半月流域에서는 流出容積이 20.8~60.1%, 尖頭流量은 0.4~22.1%의 誤差를 나타 내었다.

參 考 文 獻

1. Anderson, M. G. and T. P. Burt(1985) Hydrological Forecasting, John Wiley & Sons Ltd., pp. 405 - 436.
2. Chen, C. L. and V. T. Chow(1971) Formulation of mathematical watershed - flow model, ASCE, 97(EM3), pp. 809 - 828.
3. Chow, V. T. (1964) Handbook of Applied Hydrology, McGraw - Hill Book Co., New York.
4. Chow, V. T. and A. Ben - Zvi(1973) Hydrodynamic modeling of two - dimensional watershed flow ASCE, 99(HY11), pp. 2023 - 2040.
5. Grayman, W. M. (1985) Geographic and spatial data management and modeling, in Computer Applications in Water Resources (edited by Harry, C. T.), ASCE, New York, pp. 50 - 57.
6. Jayawardena, A. W. and J. K. White(1977) A finite element distributed catchment model, I. Analytical basis, J. Hydrology, 34(3), pp. 269 - 286.

7. Jett, S. C., A. D. Weeks and W. M. Grayman (1979) Geographic information systems in Hydrologic modeling, Proceeding of the hydrologic Transport Modeling Symposium, ASAE, St. Joseph, Michigan, pp. 127 - 137.
8. Kawahara, M. and T. Yokoyama(1980) Finite element method for direct runoff flow, ASCE, 106(HY4), pp. 519 - 534.
9. McAnally, W. H. Jr., J. V. Letter, Jr., J. P. Stewart, W. A. Thomas and N. J. Brogdon, Jr. (1984) Application of Columbia Hybrid Modeling System, ASCE, 110(5), pp. 627 - 642.
10. Partridge, P. W. and Brebbia, C. A. (1976) Quadratic finite elements in shallow water problems, ASCE, 102(HY9), pp. 1299 - 1313.
11. Pinder, G. F. and W. G. Gray (1977) Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press Inc.
12. Ross, B. B. (1978) A spatially responsive catchment model for prediction storm water runoff from ungaged watersheds, ph. D. Thesis, VPI & SU, Blacksburg, VA.
13. Sada Costa, A., A. Melo Baptista, W. G. Gray, C. A. Brebbia and G. F. Pinder(1986). Finite Elements in Water Resources, Proceedings of the 6th International Conference, A Computational Mechanics Publication.
14. 權純國, 高德九(1987) 山地流域에 대한 US-DAHL-74 流域水文模型의 長期流出 解析適用, 韓國農工學會誌, 29(2), pp. 53 - 63.
15. 權純國, 高德九(1988) 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, 韓國農工學會誌, 30(3), pp. 58 - 68.
16. 金秉辰, 朴承禹(1988) 水文模型 ANSWERS의 半月流域에의 適用, 韓國農工學會誌, 30(1), pp. 81 - 90.
17. 農水産部, 農業振興公社(1985) 流出量 推定 電算模型開發, 서울大學校 農科大學附屬 農業開發研究所
18. 農村振興廳(1976) 精密土壤圖, 湖南作物試驗場 農業技術研究所.
19. 申應培, 徐承源(1987) 河川水質의 2次元 有限要素解析, 大韓土木學會論文集, 7(3), pp. 89 - 100.
20. 尹龍男(1986) 工業水文學, 淸文閣.
21. 李基春, 朴承禹, 崔珍奎(1989) 都市 小流域의 流出變化 分析, 韓國農工學會誌, 31(1), pp. 45 - 57.
22. 李宰泳(1989) 有限要素法과 農工學에의 活用 (I), 韓國農工學會誌, 31(1), pp. 23 - 27.
23. 崔珍奎(1990) 有限要素法에 의한 小流域 流出模型의 開發, 서울大學校 大學院 博士學位論文.