

# 都市 小流域의 流出變化 分析

## Runoff Analysis of Urban Small Watershed

李 基 春\* · 朴 承 禹\*\* · 崔 珍 奎\*  
Lee, Ki Chun · Park, Seung Woo · Choi, Jin Kyu

### Summary

The hydrologic model FESHM was introduced and its applicability was investigated in an attempt to analyze the rainfall-runoff relationships of urban small watersheds and to hereafter predict the environmental changes.

Basic data on rainfall, water level, geomorphological characteristics and land use were obtained from Yeonwha stream watershed located in Chonju-si Dukjin-dong. WL-5 for simulation of subshed WS#1(136.7 ha) with urban district and WL-1 for total watershed WS#5 (278.78 ha) were selected as gaging points.

The main results gained through applications were summarized as follows.

1. Direct runoff ratio calculated from a simple separation method for WS#5, WS#1 was 20~39%, 38~62%, respectively.
2. Simulations for the runoff estimation were carried out for each watershed using 5 rainfall events, the simulation errors had the range of 2~30%, 0~63% and 0~120 minutes for the runoff volume, peak flow and peak time, respectively.
3. The effect of landuse change by urbanization was tested to WS#1, runoff volume before development was estimated as from tenth to twentieth against after development.

### I. 緒 論

流出은 물의 水文순환過程中에서 人間生活에 가장 밀접한 영향을 주는 것으로 流域에서의 降雨에 의한 反應이라고 볼 수 있다.

그러나 다른 自然系統에서와 마찬가지로 流域 水文 System은 一部 알려진 값과 알려지지 않은

많은 因子들과의 相互關係로 이루어져 있어서 매우 복잡하다.<sup>7)</sup> 이러한 複雜한 流出현상의 時間的, 定量的 分布를 正確히 豫測하는 것은 쉽지 않기 때문에 이를 解析하기 위하여 경험적, 統計的, 概念的 또는 數學的인 表現을 通하여 流域시스템을 나타내려고 노력해왔다. 특히 最近에는 土壤浸蝕, 水質變化, 土地利用變化(Urbanization,

\* 全北大學校 農科大學

\*\* 서울大學校 農科大學

surface mining 등), 管理方式의 전환 등이 河川의 水文學的 應答에 끼치는 영향과 이의 變化에 대한 關心이 높아졌다.<sup>2, 10, 14, 19, 22)</sup>

지금까지 使用되어 온 各種 水文學의 方法은 비교적 簡單한 數學的 模型에 근거를 두고 있지만 近來에는 高度, 大記憶 容量을 가진 컴퓨터의 發達로 인하여 짧은時間에 莫大한 量의 計算을 할 수 있기 때문에 解析技法도 한층 더 進일보하고 있다. 그중 有限差分法 및 有限要素法 등을 포함한 數值技法은 여러가지 工學的 原理의 適用에 널리쓰이는 強力한 道具로 發展하였으며, 전문적인 工學分野에서는 아주 普遍化되었다.<sup>8, 24)</sup>

따라서 過去에는 降雨나 地形特性이 全 流域에 平等하게 分布된 것으로 假定한 總括形(Lumped)模型을 주로 使用해 왔으나,<sup>19, 21)</sup> 오늘날에는 分布形(Distributed)模型이 많이 開發되고 있다. 分布形模型의 특징은 全 物理的 System에 크게 영향을 주는 各過程의 計算(Simulation)값을 얻을 수 있어서 土地利用變化의 영향, 空間的인 變數의 入出力, 汚染物質 및 土砂의 移動, 無計測流域의 水文學的 應答, 環境影響評價 등의 分野에 널리 適用될 수 있다는 것이다.<sup>2, 8, 17)</sup>

이러한 目的을 위해 現在 各國에서 開發된 水文學模型은 그 種類가 대단히 많을 뿐 아니라 模型의 選定과 適用은 模型의 正確度, 要求되는 精度, 자료의 形態와 有用性, 活用할 수 있는 計算設備, 計算費用, 必要한 洪水追跡의 範圍, 속련도, 實用性, 數學的 構造의 複雜性, 특수形態의 模型開發에 必要한 個人의 能力 및 투자時間 등의 要因別 相對的인 重要度에 따라 다르다.<sup>1, 6)</sup>

우리나라에서는 權等<sup>13)</sup>이 USDAHL-74模型을 경기도 都尺試驗流域에, 金等<sup>12)</sup>이 ANSWERS<sup>16)</sup>를 半月流域에 適用한 바 있다.

한편 分布形 模型은 여러가지 特徵을 가지고 있지만 反面에 一般的으로 總括模型보다 많은 成分과 Parameter를 가지고 있어 취급에 어려움이 수반된다. 따라서 適用範圍, 目的 등에 맞는지 반드시 檢定해 보아야 하고, 한편으로는 流域의 氣象 및 地形學의 特性에 맞는 適合한 水文學模型의 開發도 바람직하다. 이러한 側面에서 確定論

의 分布形模型中的의 하나로서 簡單한 有限要素法을 利用한 FESHM模型을 選定하여 小流域에 適用하고 向後 開發의 必要性을 알아 보고자 하였다.

Ross가 개발한 FESHM模型<sup>7, 19, 21)</sup>은 流域의 水文學流出量을 豫測하는데 있어서 1次元의 흐름에 動水波理論과 有限要素法을 使用하고 土地利用變化나 構造物 등에 의한 流域變化를 고려할 수 있는 伸縮性을 가진 數學的 模型으로 短期流出 解析 및 土砂移動 등을 豫測할 수 있도록 만들어져 있다.

本 研究에서는 FESHM水文學模型을 소개하고, 都市化되고 있는 小流域에 適用하여 媒介變數를 推定하고 模型의 檢證을 實施함으로써 향후 그의 適用性 여부를 檢討하는 데 目的을 두었다. 이를 위하여 全州市 덕진동 公園地區인 연화川 流域을 試驗對象流域으로 定하여 1988年 5月 1일부터 1988年 10月 31일까지 降雨, 水質 및 流出量資料를 얻는 동시에 流域의 地形學의 特性을 調査하여 基礎資料로서 整理하였으며,<sup>3)</sup> 本 研究에 이 資料를 活用하였다. 이러한 適用結果는 앞으로 本 流域의 水質分析 등의 環境變化豫測과 都市開發地區의 效率的인 土地利用形態를 摸索하는데 利用될 수 있을 것이다.

## II. 研究背景

自然的인 流域시스템을 模型化하는 데 있어서 부딪치는 問題는 그의 空間的인 異質性이다. 즉 土壤, 土地利用, 管理體系 및 傾斜 等과 같은 因子들이 排水流域에서의 流出應答에 變化를 가져오게 되는 것이다. 이런 問題를 解析하는 데 있어서 最近에 많은 研究者들은 有限要素法을 效果的인 道具로 소개하였다.<sup>5, 8, 19, 23)</sup>

有限要素法이 1950年代以後 固體力學分野에 適用되어 오기는 했지만 흐름問題에서는 1960年 후반까지 널리 使用되지는 못했다. 이 方法은 構造力學의 複雜한 問題를 解決하는 데 最初로 開發되었으며(Clough, 1960), 지금은 여러 科學 및 工學分野에 使用되는 것을 볼 수 있다.<sup>5, 26)</sup>

흐름問題에 有限要素法을 最初로 適用한 것중

의 하나는 Zienkiewicz等(1965)이 浸透水 解析에 대하여 보고한 것이다.<sup>19, 21)</sup> 그러나 地表面 흐름의 解析에 適用한 例는 많지 않다.<sup>10)</sup>

Taylor 等<sup>23)</sup>은 表面流出을 위한 無次元形態의 淺水(Shallow water)方程式을 푸는데 Galerkin 形態의 有限要素法을 使用하였으며, 다른 數值技法과 比較하여 나은 安定性, 빠른 수렴을 가져왔으며 計算時間이 적게 所要되었다고 하였다.

Judah<sup>10)</sup>는 洪水追跡模型을 開發하고 1次 不定流方程式의 解를 구하는데 Galerkin 殘差法을 使用하였다. 그는 이 模型을 自然流域에 適用하여 正確한 結果를 가져왔으며, 有限要素模型이 複雜한 地形要素, 다양한 土地利用, 降雨分佈를 쉽게 다룰 수 있다고 하였다. 또한 Cooley 等<sup>4)</sup>은 開水路 흐름에서 서로 다른 時間增分의 效果를 提示하였다.

Li 等<sup>14)</sup>은 Holtan의 浸透超過概念에 基礎를 둔 流出模型을 開發하였고, Ross等<sup>19, 21)</sup>은 FESHM 水文模型을 使用하여 가상流域의 土地利用變化에 대한 結果와 洪水調節構造物에 따른 流出水文曲線을 計算하여 比較하였으며, Heatwole等<sup>7)</sup>은 FESHM模型을 補正하여 전달損失(Transmission loss)을 說明하였다.

Jaywardena等<sup>8, 9)</sup>은 帶狀(Strip)을 等高線直角方向으로 細分하고 가상적인 等流平面에서의 解析解와 比較하였다.

近來에는 有限要素法을 淺水方程式에 適用하여 河口현상 즉, 河口沿岸의 물의 移動, 염도, 온도 등의 變化를 다룬 例가 많아지고 있다. Wang<sup>25)</sup>은 2次元層의 흐름, Kawahara 等<sup>11)</sup>은 直接流出에 適用한 바 있으며, 使用되는 技法에서도 Patridge 等<sup>18)</sup>은 2次函數를 利用하였고, Nwaogazie 等<sup>15)</sup>은 1次元의 近似式을 使用하였다.

### III. FESHM 模型

FESHM模型은 Ross(1978)<sup>20)</sup>가 地表面과 水路흐름의 偏微分方程式에 有限要素法을 利用하고 Li<sup>14)</sup>의 土壤水分 模型에 근거한 超過雨量을 合成하여 洪水追跡에 適用할 수 있도록 開發한 것이다.

## 1. 水文過程의 模型化

### 가. 流域特性的 表示(Watershed representation)

流出推定에 있어서 土壤, 傾斜, 土地利用 등의 異質의인 要素를 均등하게 하여 同質性을 가지도록 流域을 分割한다. 要素의 構成은 우선 地表面 흐름問題에 適用하여, 全體流域을 等高線圖에서 小流域(Subshed)으로 나누고 小流域은 帶狀(Strip)으로 나누고 이 Strip은 다시 要素(Element)로 나누게 된다. 또한 水文應答單位(Hydrologic Response Unit; HRU)는 超過雨量이 주어진 土地面積에 均等하게 分佈된다고 가정되는 對應面積을 말하며 土壤圖와 土地利用圖를 겹쳐서 作成한다.

### 나. 基本方程式

地表面과 河川의 流出追跡을 위한 基本式은 連續 및 運動量의 動水力學方程式이 使用되었다.

$$\text{連續方程式 } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \dots\dots\dots(1)$$

運動量方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = gA(S - S_f) - gA \frac{\partial y}{\partial x} \dots\dots(2)$$

여기서 Q=流量, q=單位길이當 橫流入量, A=流水斷面積, z=흐름方向의 거리, g=重力加速度, t=時間, S=水路바닥傾斜, S<sub>f</sub>=마찰傾斜, y=水深이다.

運動量方程式에 動水波理論을 適用하면 흐름은 水深만의 函數로서 S=S<sub>f</sub>로 간략化시킬 수 있으며, 따라서 Manning 또는 유사한 等流公式을 使用하여 마찰저항을 나타낼 수 있다.<sup>17, 20)</sup>

### 다. 超過雨量 計算

超過雨量은 各 要素마다 算定되고 式 (3)과 같이 要素內의 HRU에 따라 加重值로 決定된다.

$$P_e = \sum_{i=1}^N \left( \frac{a_i}{A_e} \right) R_i \dots\dots\dots(3)$$

여기서 P<sub>e</sub>=各 要素의 加重超過雨量, A<sub>e</sub>=要素面積, a<sub>i</sub>=i번째 HRU 面積, R<sub>i</sub>=i번째 HRU의 超

過雨量, N=要素內的 HRU數이다.

라. 浸透率

要素內 各 HRU의 超過降雨를 算定하기 위한 浸透量方程式은 Holtan式을 利用하였으며, 超過雨量 算定時 증발산, 中間차단 및 地面貯溜 等은 고려하지 않고 있다.

$$f = a S^n + f_c \dots \dots \dots (4)$$

여기서 f=浸透率, a=피복조건에 따른 指數, S=非充滿 貯溜空間, f\_c=最終浸透率, n=土壤水 理特性에 따른 係數이다.

2. 有限要素法

위의 式(1)은 有限要素法中的 하나인 Galerkin殘差法(residual method)에 의하여 풀었다. 節點에서의 未指數 A, Q는 各 要素에서 x方向으로 分布된다고 가정하면 式 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(x, t) \approx A^*(x, t) = \sum_{i=1}^{NN} N_i(x) A_i(t) = [N] \{A\} \dots \dots \dots (5)$$

$$Q(x, t) \approx Q^*(x, t) = \sum_{i=1}^{NN} N_i(x) Q_i(t) = [N] \{Q\} \dots \dots \dots (6)$$

여기서 A\_i(t)=時間만의 函數로서 面積, Q\_i=時間만의 函數로서 流量, N\_i=補間函數(Interpolation function), NN=要素內的 節點數이다.

위식에 Galerkin residual method를 適用하고 各 要素마다 試行函數(Trial function)가 代入되어 다음과 같이 表現된다.

$$\sum_{e=1}^{NE} \int_{De} \left\{ N_i \left[ \frac{\partial Q^*}{\partial x} + \dot{A}^* - q \right] \right\} dDe = 0 \dots \dots \dots (7)$$

여기서 NE=要素數, A=面積의 時間微分値, De=주어진 要素의 Domain이다.

한개의 要素를 생각하면 式(8)과 같으며, 式의 各項을 積分하고 A를 간단한 양함수 形態로 나타내면 式(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{De} \left[ N_i \frac{\partial N_i}{\partial x} (Q + N_i \dot{A}) - N_i q \right] dDe = 0 \dots \dots (8)$$

$$\frac{1}{dt} [K] \{A\}_{t+dt} - \frac{1}{dt} [K] \{A\}_t + [L] \{Q\}_t - lq \{M\} = 0 \dots \dots \dots (9)$$

時間에 의존하는 경우 初期값으로 t=0일 때 모든 節點에서의 흐름은 0이며 境界條件으로 모든 時間에 대하여 Strip의 最上端部에서의 흐름은 0이다.

이 過程에서 한 要素의 1次元的 흐름은 式(10)과 같은 行列式으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix} t + \Delta t = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix} t - \frac{Q_2 - Q_1}{l} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + q \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (10)$$

여기서 A\_1, A\_2=Node 1, 2에서의 斷面積, Q\_1, Q\_2=Node 1, 2에서의 流量, Δt=時間增分이다.

위 式에 의하여 地表面이나 水路의 全體 Node數의 크기에 맞는 要素行列式的 組合過程이 이루어진다.

3. 模型의 構成 및 入力資料

模型은 1개의 main 프로그램과 8개의 Subroutine으로 構成되어 있고, 模型의 入力資料는 模擬發生 調節情報, 降雨, HRU와 要素의 배치, 土地利用, 計算時間增分 및 追跡順序, 地表面 및 水路要素의 제원, 構造物의 特性等이다.

IV. 模型의 適用

1. 試驗流域과 水文特性

가. 位置 및 流域의 分割

本 模型에 適用된 流域은 全州市 덕진동 연화川上流에 位置하여 全北大學校와 接하고 있는 流域面積 2.788km<sup>2</sup>의 小流域이다. 流域內에는 덕진公園, 動物園, 體育公園 等과 全北大 병원을

包舍한 新開發地區가 자리잡고 있다. (Fig. 1)  
 模型을 適用하기 위한 流域의 分割은 地形的

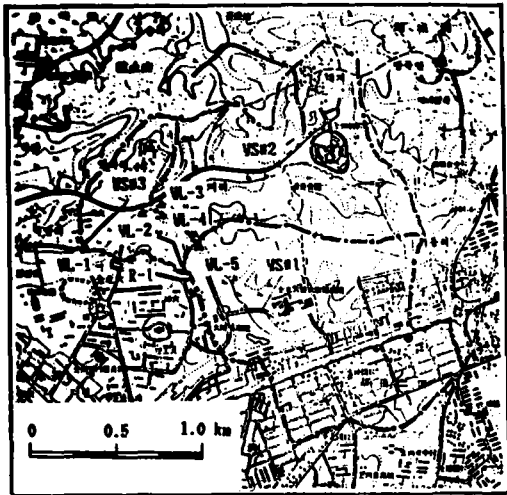


Fig. 1. Location map of the studied watershed.

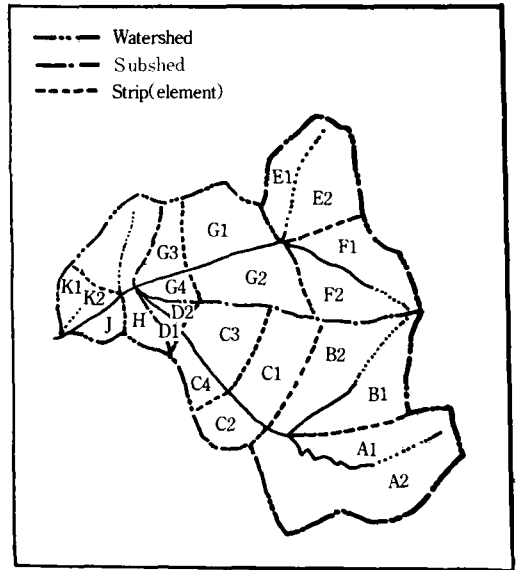


Fig. 2. Segmentation of the watershed (24 elements).

Table-1. Physiographical characteristics of watersheds.

Items	WS # 1	WS # 2	WS # 3	WS # 4	WS # 5
Watershed area(km <sup>2</sup> )	1.367	1.082	0.338	0.142	0.279
Length of stream(m)	1800	1650	780	2150	2580
Relief ratio	0.068	0.061	0.112	0.047	0.043
Highest elevation(m)	120.1	120.1	76.1	120.1	120.1
Lowest elevation(m)	30.0	28.0	26.0	26.0	26.0
Shape factor	0.422	0.398	0.556	0.307	0.419
Stream density	1.353	1.617	2.306	1.588	1.471
Mean slope of stream	0.015	0.018	0.003	0.014	0.011

인 面을 고려하여 Fig. 2와 같이 3개의 Subshed (WS # 1, 2, 3), 11개의 Strip, 24개의 element로 나누었다. 또한 편의상 WS # 2와 WS # 3를 합하여 WS # 4로, WS # 1, 2, 3를 포함한 全 流域을 WS # 5로 區分하였다.

나. 流域의 地相因子

本 流域의 地相因子는 1 : 25,000 및 1 : 5,000 地形圖를 利用하여 구하였으며, 이 값들은 Table 1과 같다.

다. 土地利用狀態

各 流域別 畚, 田(과수원), 林野 等の 面積構

成比는 Table-2 와 같다.

라. 土壤

適用對象인 연화천流域의 土壤은 개략토양도로부터 分類한 바 壤土, 砂壤土로 構成되어 있으며, 各各의 構成比는 Table-3. 과 같다.

마. 水文應答單位(HRU)

本 流域의 HRU는 11種類로 分類하였다. (Table -5)

2. 初期條件

降雨가 發生하기전 流域內의 先行土壤水分條

Table-2. Classification of land use (ha).

Watershed Item	WS # 1	WS # 2	WS # 3	WS # 4	WS # 5
				(WS # 2,3)	(WS # 1,2,3)
Paddy	3.434	5.677	6.421	12.038	15.522(5.57)
Field	5.189	11.092	3.08	14.172	19.361(6.95)
Woods	39.009	68.446	20.52	88.966	127.975(45.91)
Grass	-	10.601	-	10.601	10.601(3.80)
Residential	71.218	3.684	3.804	7.488	78.706(28.23)
Idleland	17.875	8.725	-	8.725	26.60(9.54)
Total	136.725	108.225	33.825	142.05	278.765

( ) Percent ratio

Table-3. Classification of soil type (ha).

Item	WS # 1	WS # 2	WS # 3	WS # 4	WS # 5
Loam	117.14(85.7)	90.99(84.1)	31.54(93.2)	122.53(86.3)	239.67(86.0)
Sandy loam	19.59(14.3)	17.23(15.9)	2.29(6.8)	19.52(13.7)	39.11(14.0)
Total	136.73	108.22	33.83	142.05	278.78

( ) Percent ratio

Table-4. Characteristics of selected rainfall events and SMCWS.

Storm events	Date	Time	Rainfall (mm)	Antecedent rainfall(mm)			SMCWS
				3days	10days	30days	
1	'88.5. 3	05:00-09:45	10.7	2.2	2.2	61.0	0.25
2	5. 7	02:00-12:15	39.2	0.3	14.3	72.5	0.30
3	7.26	05:45-24:00	26.2	4.6	70.5	245.8	0.92
4	9. 2	13:30-17:00	10.9	5.6	17.2	45.5	0.95
5	9.10	07:45-24:00	24.2	0.0	14.7	60.2	0.30

件(Antecedent soil moisture condition)은 初期地表面流出 및 流出容積의 決定에 重要な 因子가 된다. 여기서는 3日前, 10日前, 30日前의 降水量에 따라 先行土壤水分條件을 나타내는 變數 SMCWS를 假定하였다. (Table-4.) FESHM模型에서의 SMCWS는 다음과 같이 간략화된 土壤水分収支式에서 決定된다.<sup>20)</sup>

$$\theta_t = \theta_{t-1} + P_t - ET_t - DS_t - R_t \dots (11)$$

여기서 t=時間간격(day),  $\theta_t$  = 土壤水分量,  $\theta_{t-1}$  = 前日土壤水分量,  $P_t$  = 降水量,  $ET_t$  = 증발산

량,  $DS_t$  浸透損失(Deep Seepage loss),  $R_t$  = 流出損失(Runoff loss)이다.

위 式을 計算할 때 다음과 같은 假定을 하였다.

- (1) 適用될 降雨事象 30日前의  $\theta_0$ 는 50%이다.
- (2) 地面貯溜, 차단 等 損失은 無視한다.
- (3) 日잠재증발산량은 30日동안 均一하다.
- (4) 降雨時 實際증발산량은 잠재증발산량의 1/2이다.

### 3. 媒介變數의 補正

FESHM模型의 媒介變數는 先行土壤水分條

Table-5. Characteristics of hydrologic response units.

HRU No.	Cover coeff.	Plant available water storage (in/in)	Gravitational water storage (in/in)	Final infiltration rate (in/hr)	Depth to impeding layer (ins)	Soil type	Land use	Manning n
1	0.30	0.123	0.186	0.13	4.0	SL	Idleland	0.07
2	0.90	0.123	0.186	0.13	4.0	SL	Woods	0.20
3	0.70	0.123	0.186	0.13	4.0	SL	Grass	0.12
4	0.70	0.123	0.186	0.13	4.0	SL	Orchard	0.10
5	0.05	0.012	0.018	0.02	0.3	SL	Residential	0.03
6	0.05	0.015	0.014	0.02	0.3	L	Residential	0.03
7	0.30	0.156	0.144	0.11	6.0	L	Paddy	0.10
8	0.70	0.156	0.144	0.11	6.0	L	Orchard	0.10
9	0.30	0.156	0.144	0.11	6.0	L	Idleland	0.07
10	0.70	0.156	0.144	0.11	6.0	L	Grass	0.12
11	0.90	0.156	0.144	0.11	6.0	L	Woods	0.20

SL=Sandy loam

S=Loam

件, 最終浸透率, 地表面 및 水路의 粗度係數 等으로 이들의 假定된 값을 1988年 5月 3日과 5月 7日 및 7月 26日의 3 降雨에 대하여 試行錯誤法을 利用하여 反復시켰고, 이렇게 決定된 媒介變數를 9月 2日 및 9月 10日의 降雨에 適用하여 觀測水文曲線과 模擬發生水文曲線의 結果를 比較하였다. 이는 처음 3 降雨事象의 降水量이 10.7 mm, 39.2mm, 26.2mm로서 서로 相異한 數値를 가지고 있어서 다음에 檢討될 2개 降雨時의 流出結果와 對照시킬 수 있는 비슷한 양상을 기대했기 때문이다. 여기에 使用된 降雨資料와 水文應答單位別 媒介變數의 推定値는 Table-4와 Table-5에 整理된 바와 같고, 計算結果 媒介變數中 先行土壤水文條件과 浸透率이 가장 重要한 因子로 判斷되었다.

4. 模擬發生 結果

流出分析에 使用된 降雨資料는 1988年 5月 1日부터 1988年 10月 31日까지 自記雨量計로 測定된 降雨事象中 5개를 選定하였다. (Table - 4)

Fig. 3에서 Fig. 7까지 아래에 圖示한 그림(WL-5)이 新開發地區를 포함하고 있는 WS #1의 各

降雨時 觀測流量과 模擬發生시킨 流量을 比較하여 나타낸 것이며, Table-6은 이를 要約한 것이다.

Table-6의 結果를 보면 流出容積(流出率)은 38~62%가 流出된 것으로 觀測되었는데 이는

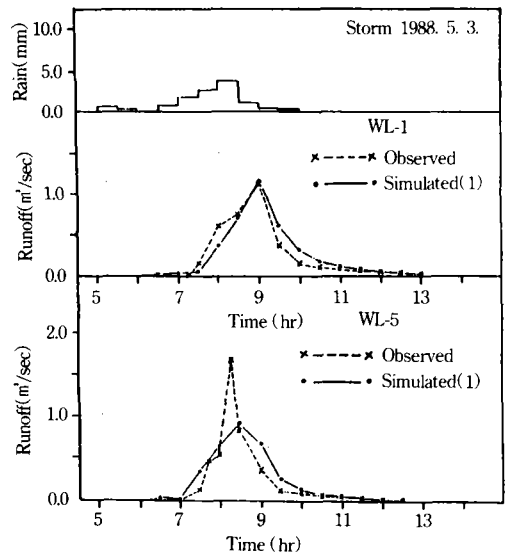


Fig. 3. Observed and simulated hydrographs (1988. 5. 3.).

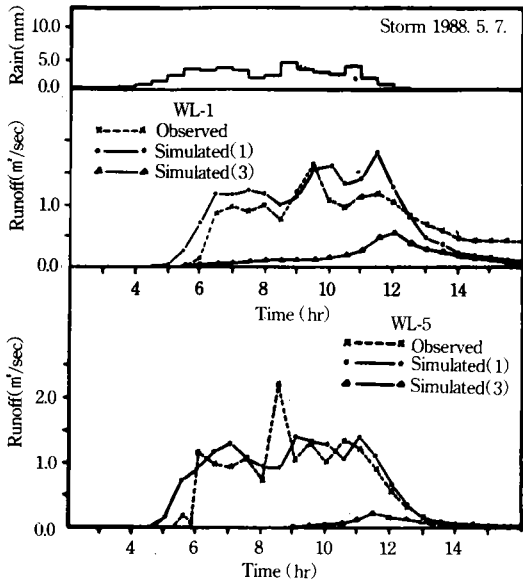


Fig. 4. Observed and simulated hydrographs (1988. 5. 7.).

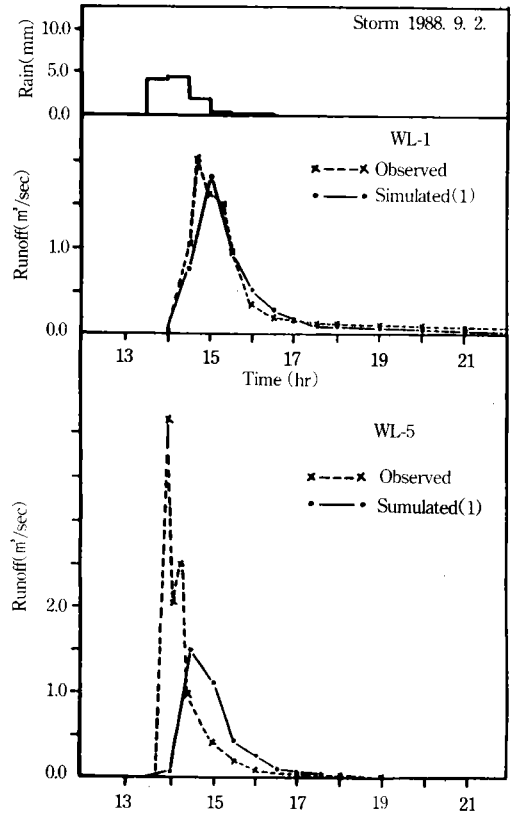


Fig. 6. Observed and simulated hydrographs (1988. 9. 2.).

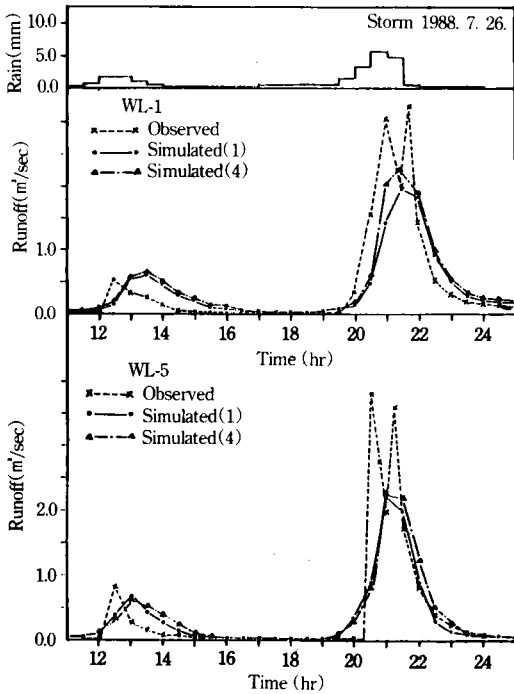


Fig. 5. Observed and simulated hydrographs (1988. 7. 26.).

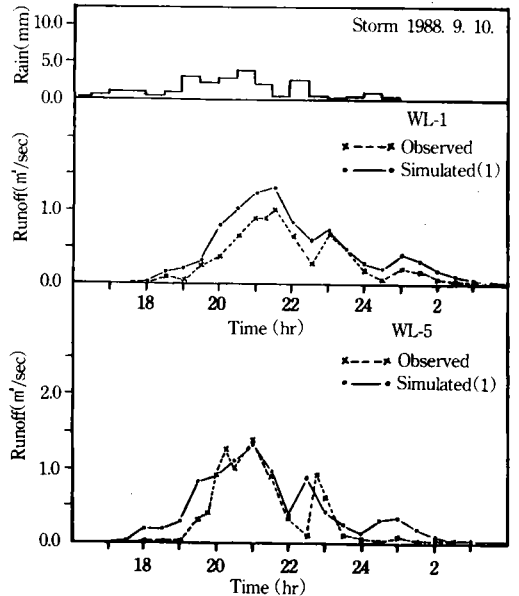


Fig. 7. Observed and simulated hydrographs (1988. 9. 10.).



Table-6. Results of hydrologic Simulation(WL-5).

Storm event	Total Volume (m <sup>3</sup> )	Runoff volume(m <sup>3</sup> )			Peak flow(m <sup>3</sup> /sec)			Peak time		Calculation time
		Observed	Sim.(1)	Error	Observed	Sim.(1)	Error	Observed	Sim.(1)	
1	14,630	5,915 (40.4)*	6,405 (43.8)*	-490 (-8.3)	1,746	0,957	0.778 (45.2)	08:15	08:30	15:00-14:00
2	53,596	28,016 (52.3)	28,841 (53.8)	-825 (-2.9)	2,456	1,405	1.051 (42.8)	08:30	11:00	02:00-16:00
3	35,822	18,571 (51.8)	18,968 (53.0)	-397 (-2.1)	3,742	2,203	1.539 (41.1)	20:30	21:00	06:00-7/27.8:00
4	14,903	9,282 (62.3)	7,062 (47.4)	2,220 (23.9)	4,185	1,534	2.651 (63.3)	14:00	14:30	13:00-24:00
5	33,087	12,764 (38.6)	17,140 (51.8)	-4,376(-34.3)	1,440	1,386	0.054 (0.4)	21:00	21:00	08:00-9/11.07:00

( ) \*Ratio to total volume

直接流出을 水平直線分離法으로 分離하여 計算된 값이다.

또한 觀測流出容積과 模擬發生된 容積과의 誤차는 2~34%로서 比較적 良好하였고, 尖頭流量 誤차는 0~63%였으며, Peak time에서는 模擬發生된 結果가 대부분 늦게 나타났다. 이는 여러가지 原因이 있겠지만 流達時間에 크게 影響을 주는 粗度係數의 變化에서 오는 結果가 아닌가 생각된다.

5. 模型의 檢證

FESHM模型의 檢證은 基本 適用對象이었던 WS # 1 流域에 使用된 降雨資料, 先行土壤水分條件, 기타 媒介變數를 WS # 1이 包含된 全體流域 WS # 5에 그대로 適用함으로써 그 實用性을 檢證하였다. 그 結果를 實測資料와 함께 要約하면 Table 7과 같고, Fig. 3에서 Fig.7까지 위에 나타난 그림(WL-1)은 이를 比較하여 圖示한 것이다.

模型의 檢證 結果, 流出容積은 20~39%가 流出된 것으로 算定되었다. 여기서 特異한 點은 各 降雨別 流出量의 79~95%가 WL-5地點을 통과한 流量인데, 이는 WL-5地點의 排水流域 WS # 1이 全 流域面積의 절반정도인 點을 감안하면 많은 量이다. 이 結果는 WS # 1 流域의 절반以上이 住居地域, 道路, 建物 等으로 이루어진 新開發地 區이기 때문에 많은 流出이 이루어 졌다고 볼 수 있으며, 이러한 현상은 平常時의 흐름에서도 WS # 1의 汚水量이 流量의 大部分을 차지하고 있음이 實測되었다.

한편 觀測과 模擬發生된 流出容積과의 誤차는 3~36%, 尖頭流量誤차는 1~40%였으며, Peak time에서는 5월 7日의 경우를 除外하고는 비슷하게 一致하였다.

大體의인 結果를 볼때 觀測 및 模擬發生 水文曲線의 形態는 비슷하였으나, 모든面에서 誤차가 있었으며, 이는 流域의 分割과 各 媒介變數의 값

Table-7. Results of hydrologic Simulation(WL-1).

Storm event	Total Volume (m <sup>3</sup> )	Runoff volume(m <sup>3</sup> )			Peak flow(m <sup>3</sup> /sec)			Peak time	
		Observed	Sim.(1)	Error	Observed	Sim.(1)	Error	Observed	Sim.(1)
1	29,829	6,426 (21.5)*	7,009 (23.5)*	-583 (-9.1)	1,155	1,148	0.007 (0.6)	09:00	09:00
2	109,276	32,794 (30.0)	33,813 (20.9)	-1,019 (-3.1)	1,588	1,759	-0.171 (-10.8)	09:30	11:30
3	73,036	23,642 (32.4)	22,407 (30.7)	1,235 (5.2)	3,280	1,955	1.325 (40.4)	22:15	21:30
4	30,385	11,694 (38.5)	9,535 (31.4)	2,159 (18.5)	2,053	1,836	0.217 (10.6)	14:45	15:00
5	67,461	13,459 (20.0)	18,334 (27.2)	4,875 (36.2)	1,076	1,350	-0.274 (25.5)	21:30	21:30

( ) \*Ratio to total volume

이 實際에 맞도록 正確하게 補正되지 않은 結果라고 볼 수 있으며 차후 이에 대한 補完이 絶실히 要求된다.

### 6. 模型의 應用

媒介變數의 補正과 模型의 檢證을 통하여 얻어진 結果를 土臺로 FESHM模型의 入力資料中 計算時間간격, 土地利用, 分割要素數를 變化시킴으로써 얻어진 模擬發生 結果를 中心으로 模型

의 適用性을 檢討하였다.

가. 計算時間(Calculation time increment;  $\Delta t$ )

流出分析을 위한 地表面 및 水路의 模擬發生 計算간격은 地表面 180 secs, 水路 60 secs를 基準으로 使用하였는데 이의 正確度를 比較하기 위하여 各各 60 secs, 30 secs를 入力하여 計算하였다. 그 結果 Table-8에 나타난 바와 같이, WL-1, WL-5 地點모두 流出容積, 尖頭流量에서의 誤差가 各各 0~1.4%, 0.3~5.4%로서 큰 差異를 나

Table-8. Simulation results by different calculation time.

Station	Storm event	Runoff volume(m <sup>3</sup> )			Peak flow(m <sup>3</sup> /sec)			Peak time	
		Sim. (1)	Sim. (2)*	Difference	Sim. (1)	Sim. (2)	Difference	Sim. (1)	Sim. (2)
WL-1	1	7.009	7.014	-5 (0.07)	1.148	1.126	0.022 (1.9)	09 : 00	09 : 00
	2	33.813	33.823	-10 (-0.03)	1.759	1.777	-0.018 (-1.0)	11 : 30	11 : 30
	3	22.407	22.110	297 (1.3)	1.955	1.964	-0.009 (-0.46)	21 : 30	21 : 30
	4	9.535	9.530	5 (0.05)	1.836	1.808	0.028 (1.5)	15 : 00	15 : 00
	5	18.334	18.335	-1. (-0.005)	1.350	1.355	-0.005 (-0.37)	21 : 30	21 : 30
WL-5	1	6.405	6.385	20 (0.3)	0.957	0.910	0.047 (4.9)	08 : 30	08 : 30
	2	28.841	28.792	49 (0.17)	1.405	1.356	0.049 (3.5)	11 : 00	11 : 00
	3	18.968	19.015	-47 (-0.25)	2.203	2.253	-0.05 (-2.3)	21 : 00	21 : 00
	4	7.062	7.162	-100 (-1.4)	1.534	1.451	0.083 (5.4)	14 : 30	14 : 00
	5	17.410	17.303	107 (0.6)	1.386	1.362	0.024 (1.7)	21 : 00	21 : 00

\* Calculation time increment-overland 60 secs, channel 30 secs.

Table-9. Simulation results by different land use.

Station	Storm event	Runoff volume(m <sup>3</sup> )			Peak flow(m <sup>3</sup> /sec)			Peak time	
		Sim. (1)	Sim. (3)*	Difference	Sim. (1)	Sim. (3)	Difference	Sim. (1)	Sim. (3)
WL-1	1	7,009	558	6,451 (92.0)	1.148	0.041	1.107 (96.4)	09 : 00	10 : 00
	2	33,813	6,795	27,018 (80.0)	1.759	0.502	1.257 (71.5)	09 : 30	12 : 00
	3	22,407	4,821	17,586 (78.5)	1.955	0.358	1.597 (81.7)	22 : 15	22 : 30
	4	9,535	1,912	7,623 (80.0)	1.836	0.142	1.694 (92.3)	14 : 45	15 : 30
	5	18,334	2,402	15,932 (86.8)	1.350	0.107	1.234 (92.0)	21 : 30	22 : 00
WL-5	1	6,405	-	6,405 (100)	0.957	-	0.957 (100)	08 : 15	-
	2	28,841	2,005	26,836 (93.0)	1.405	0.208	1.197 (85.2)	08 : 30	11 : 30
	3	18,968	1,439	17,529 (92.4)	2.203	0.134	2.069 (93.9)	20 : 30	22 : 00
	4	7,062	584	6,478 (91.7)	1.534	0.065	1.469 (95.7)	14 : 00	15 : 00
	5	17,410	379	17,031 (97.8)	1.386	0.024	1.362 (98.?)	21 : 00	21 : 30

\* Before development

타내지 않았다.

이 結果는 正確하고 充分한 資料라는 假定이 前提되는 斷片的인 한 例에 불과하지만, 本 流域 流出量 算定時 計算時間增分을 너무 짧게 취할 必要는 없다고 판단되었다.

나. 土地利用變化

土地와 空間構成的 利用, 特히 都市開發地域의 開發影響을 水文學的으로 評價하기 위하여 현재 住居地域, 公共建物, 道路 等으로 變化된 新開發 地區를 包含하고 있는 WS # 1流域을 檢討對象으로 하였다. 즉 WS # 1에 包含된 住居地域을 開發前에는 山林地域으로 假定하고 이에 따른 流出量을 模擬發生시켜 그 結果를 要約한 것이 Table 9이다. (Fig. 4)

Table-9에서 보는 바와같이 流出容積과 尖頭 流量은 觀測값의 1/10~1/20 程度로 현저히 줄어들었는데, 이는 開發되기 前의 流出量을 概略的으로 推定할 수 있음을 보여준 것이다. 또한 崔等<sup>3)</sup>의 結果에서 언급했듯이 現在 河川의 斷面不足이 都市開發로 因한 土地利用變化가 큰 原因中의 하나이고, 아울러 土地利用狀態가 流出에 큰 影響을 끼치고 있음을 端的으로 나타낸 것이라고 볼 수 있다.

다. 分割要素數

流出量算定時 流域內의 要素를 몇개로 나누는

것이 合理的인가를 判斷하기는 쉽지 않다. 그래서 이를 概略的으로 檢討하기 위하여 Fig. 2에 나타난 24개의 要素에서  $G_1$ 과  $G_2$ ,  $G_3$ 과  $G_4$ ,  $C_1$ 과  $C_2$  및  $D_2$ ,  $C_2$ 와  $C_1$  및  $D_1$ , J와 H, I와 K를 各各 한 개의 要素로 舍한 후 14개의 要素로 調整하여 模擬發生시켰으며, 이 結果를 要約한 것이 Table-10이다. (Fig. 5)

Table 10의 結果를 볼때 要素數를 줄였을때의 流出容積은 약간 늘었고 尖頭流量은 높게 또는 낮아졌으며, Peak time은 비슷하였다. 그러나 전반적으로 볼때 流出容積의 誤差는 커지는 것으로 나타났다. 물론 이 結果는 分割時 注意가 要求되고 또한 더 많은 要素로 區分하여 比較할 必要性이 있지만 이에 대한 檢討價値는 充分히 있는 것으로 생각된다.

V. 要約 및 結論

都市 小流域의 降雨-流出關係의 解析과 向後 水質分析 等の 環境變化를 豫測하고 더 나아가 새로운 水文模型을 開發하기 위한 基礎的 段階로서 FESHM 水文模型의 適用性을 檢討하였다. 對象流域은 全州市 덕진동 연화천流域으로 降雨, 水位, 地形特性 및 土地利用狀態에 대한 基礎資料를 얻는 동시에 이 資料를 活用하여 流出

Table-10. Simulation results by different element numbers.

Station	Storm event	Runoff volume(m <sup>3</sup> )			Peak flow(m <sup>3</sup> /sec)			Peak time	
		Sim. (1)	Sim. (4)*	Difference	Sim. (1)	Sim. (4)	Difference	Sim. (1)	Sim. (2)
WL-1	1	7,009	7,906	-897 (-12.8)	1.148	1.129	0.019 (1.7)	09 : 00	09 : 00
	2	33,813	33,398	-4,585 (-13.6)	1.759	1.905	-0.146 (-8.3)	11 : 30	11 : 30
	3	22,407	25,260	-2,853 (-12.7)	1.955	2.288	-0.333 (-17.5)	21 : 30	21 : 30
	4	9,535	10,478	-943 (-9.8)	1.836	1.794	0.042 (2.3)	15 : 00	15 : 00
	5	18,334	21,068	-2,734 (-14.9)	1.350	1.465	-0.115 (-8.5)	21 : 30	21 : 00
WL-5	1	6,405	7,554	-1,149 (-17.9)	0.957	1.055	-0.098 (-10.2)	08 : 30	08 : 30
	2	28,841	33,871	-5,030 (-17.4)	1.405	1.614	-0.209 (-14.9)	11 : 00	11 : 00
	3	18,968	21,906	-2,938 (-15.4)	2.203	2.261	-0.058 (-2.6)	21 : 00	21 : 00
	4	7,062	9,243	-2,181 (-30.9)	1.534	1.593	-0.059 (-3.8)	14 : 30	14 : 30
	5	17,410	19,635	-2,225 (-12.8)	1.386	1.510	-0.124 (-8.9)	21 : 00	21 : 00

\* Simulated with 14 elements.

解析을 實施하였으며, 그 主要結果는 다음과 같다.

1. 直接流出을 水平直線分離法으로 分離하여 計算한 結果 WL-1, WL-5地點이 各各 20~39%, 38~62%로 算定되었다.

2. 都市開發區域 WS # 1과 動物園을 包含한 全流域 WS # 5에 5개 降雨事象資料를 利用하여 流出量을 推定하고, 이를 觀測值와 比較한 結果 總 流出容積(2~36%), 尖頭流量(0~63%), Peak time(0~120分)에서 전반적으로 差異가 發生하였다.

3. 模擬發生을 위한 地表面 및 水路의 計算時間간격은 各各 180 secs, 60 secs를 基準으로 하였는데 60 secs, 30 secs를 使用한 結果와는 큰 差異가 없는 것으로 나타났다.

4. 都市開發 等 土地利用變化에 따른 流出變化를 檢討하기 위하여 WS # 1流域의 開發前(假定)과 開發後(現在)를 比較한 開發前 流出量은 現在의 1/10~1/20程度일 것으로 推定되었다.

5. 分割要素數에 따른 模擬發生結果를 比較하기 위하여 各各 24개, 14개의 Element로 나누어 流出量을 算定한 24개의 要素로 나누는 것이 좀 더 나은 結果를 얻을 수가 있었다.

위와 같은 結果들은 短期間의 資料를 利用하였기 때문에 앞으로 充分한 氣象, 流出, 地形學的 資料를 수집하고 各種 媒介變數의 正確한 값이 決定되면 그의 適用性은 커지리라고 생각된다.

本 研究는 1988年度 文敎部 學術研究 造成費 支援에 依하여 遂行되었음.

### 參 考 文 獻

1. Anderson, M. G. and T. P. Burt(1985) Hydrological Forecasting, John Wiley & Sons Ltd.
2. Beasley, D. B., L. F. Huggins and E. J. Monke (1982) A monitoring/modeling strategy for 208 implementation, Trans, ASAE. 25(3) : 654-660, 665
3. 崔珍奎, 李基春, 李明雨(1989) 연화천 流域의 流出解析을 위한 水文學的 基礎調查, 全北大

- 學校 農大論文集, 第 20 輯.
4. Cooley, R. L. and Moin, S. A. (1976) Finite element solution of Saint-Venant equations, ASCE. 102(HY 6) : 759-773
5. Desai, C. S. (1979) Elementary Finite Element Method, Prentice-Hall Inc.
6. Haan, C. T., H. P. Johnson and D. L. Brakensiek(1982) Hydrologic Modeling of Small Watersheds, ASAE Monograph No. 5
7. Heatwole, C. D., V. O. Shanholtz and B. B. Ross(1982) Finite element model to describe overland flow on an infiltrating watershed, Trans. ASAE. 25(3) : 630-637
8. Jayawardena, A. W. and J. K. White(1977) A finite element distributed catchment model : I. Analytical basis, J. Hydrology, 34(3) : 269-286
9. Jayawardena A. W. and J. K. white(1979) A finite element distributed catchment model : II. Application to real catchments, J. Hydrology, 42(3) : 231-249
10. Judah, O. M., V. O. Shanholtz and D. N. Contractor(1975) Finite element simulation of flood hydrographs, Trans. ASAE. 18(3) : 518-522
11. Kawahara, M. and T. Yokoyama(1980) Finite element method for direct runoff flow, ASCE. 106(HY 4) : 519-534
12. 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) : 81-90
13. 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) : 53-63
14. Li, E. A., V. O. Shanholtz, D. N. Contractor and J. C. Carr(1977) Generating rainfall excess based on readily determinable soil and landuse characteristics. Trans. ASAE. 20(6) : 1070-1078
15. Nwaogazie, F. I. L. and A. K. Tyagi(1984) Unified streamflow routing by finite eleme-

- nts, ASCE. 110(11) : 1595-1611
16. Rark, S. W., J. K. Mitchell and J. N. Scarborough(1982) Soil erosion simulation on small watersheds : A modified ANSWERS Model, Trans. ASAE. 25(6) : 1581-1588.
  17. 朴承禹(1984) 小流域 水文模型의 開發과 應用(1), 韓國農工學會誌, 26(2) : 125-132
  18. Partridge, P. W. and Brebbia, C. A. (1976) Quadratic finite elements in shallow water problems, ASCE. 102(HY 9) : 1299-1313
  19. Ross, B. B., D. N. Contractor and V. O. Shanholtz(1977) Finite element simulation of overland and channel flow, Trans. ASAE. 20(4) : 705-712
  20. Ross, B. B. (1978) A spatially responsive catchment model for predicting stormwater runoff from ungaged watersheds, Ph. D Thesis, VIP & SU, Blacksburg, VA.
  21. Ross, B. B., D. N. Contractor and V. O. Shanholtz(1979) A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrologic impact of landuse change, J. Hydrology, 41(1) : 11-30
  22. Smith, R. E.(1981) A kinematic model for surface mine sediment yield, Trans. ASAE. 24(6) : 1508-1514.
  23. Taylor, C., Al-Mashidani, G. and Davis, J. M. (1974) A finite element approach to watershed hydrology, J. Hydrology, 21(3) : 231-246
  24. Turner, J. et al(1985) Teaching finite elements in agricultural engineering, Trans. ASAE. 28(1) : 51-55
  25. Wang, J. D.(1979) Finite element model of 2-D stratified flow, ASCE. 105(HY 12) : 1473-1485
  26. Zienkiewicz, O. C.(1977) The Finite Element Method(3rd edition), McGraw Hill International Book Co.