

地形學的 瞬間單位圖에 의한 尖頭流量的 降雨-流出 線形解析

A Linear Analysis of the Relation between Rainfall and Runoff for Peak Flow based on Geomorphologic IUH

李	正	植*
Lee,	Jung	Sik
金	再	韓**
Kim,	Jae	Han
李	元	煥***
Lee,	Won	Hwan

Abstract

The schemes synthesizing the instantaneous unit hydrograph(IUH) are presented by using the geomorphologic parameters of a basin. To this end, the channels in the network are numbered according to the Strahler scheme, and the mathematical formulation corresponding to a dynamic probability theory for deriving the geomorphologic IUH(GUH) is referred to the existing techniques adopted by Rodriguez-Iturbe and Valdes. Also, the mean runoff velocity is applied for expressing a dynamic state of flow.

The applicability of the GUH to the real drainage basins is tested by using the data observed in a few basins with areas of the order of 9.2, 20, 33.63, and 109.73km² in Korea. The test is carried out by checking the discrepancies between the observed and simulated values for the peak discharge and its time of occurrence which are the most important parameters of an IUH by varying the mean runoff velocity and the inputs.

As a result, good agreement is found between them, and it is shown that the variability in peak discharge of hydrograph depends on the mean runoff velocity more than the constant loss rate.

要 旨

單位圖合成을 위하여 既存 地形學的 瞬間單位圖의 概念을 導入하였다. 이를 위한 河川次數의 技法은 Strahler의 次數法則을 利用하였으며, 河川水의 動的狀態를 나타내기 위하여 平均流出速度가 使用되었다. 地形學的 特性因子들로부터 決定된 瞬間單位圖를 IHP 代表試驗流域인 慶安川, 無心川, 渭川流域에 適用하여 尖頭流量 및 到達時間을 計算하였고, 實測資料와의 比較檢討를 통

* 正會員 · 金鳥工科大学 專任講師, 土木工學科

** 正會員 · 忠南大學校 工科大学 副教授, 土木工學科

*** 正會員 · 延世大學校 工科大学 教授, 土木工學科

하여 GUH의 適用性을 立證하였으며, 增減된 平均流出速度와 假定된 損失率을 適用시킴으로써 水文曲線의 尖頭流量의 變化는 一定損失率 보다 平均流出速度에 따라 크게 左右됨을 알 수 있었다.

1. 序 論

自然 河川流域에서는 利水 및 治水의 目的으로 堤防, 灌溉用水路, 暗渠 등의 水工構造物이 建設되고 있으며, 이러한 水工構造物의 크기나 工事費는 設計洪水量의 決定에 따라 커다란 차이를 보이고 있다. 過多한 設計洪水量은 불필요한 工事費의 增加를 가져오며, 반면에 設計洪水量을 過少하게 결정할 경우에 洪水時 水工構造物의 파괴로 인한 財產 및 人命의 피해를 예상할 수 있으므로 水工構造物의 最適設計를 위하여 降雨로부터 程度가 높은 流出量의 解析이 요구된다. 그러나 水工構造物의 大部分은 水文觀測施設이 되어있지 않은 未計測流域에 建設되므로써 流出量의 算定에 어려움이 많았다.

최근에 未計測流域에서의 流出解析을 위하여 流域의 地形學의 因子를 고려한 確率論의 모델의 開發이 擡頭되므로써 降雨와 流出 模型의 媒介變數들 사이에 物理的 特性들을 論해 주고 있다.

流域의 特性를 나타내는 河川 形態學의 定量的인 分析은 Horton이 提案한 次數概念을 始點으로 발전되었으며⁽²⁾, 水文學의 應答의 研究에 地形學의 構造를 연결시키는 교량 역할을 하였다. 1970年代 初에 Gregory와 Walling⁽⁵⁾은 排水流域의 形態나 過程을 地形學의 接近方法에 의하여 總括적으로 說明하였으며, 流域의 水文學의 應答과 地形學의 構造를 結合시키는 試圖는 Rodriguez-Iturbe와 Valdes에 의하여 시작되었다. Rodriguez-Iturbe와 Valdes⁽¹²⁾는 地形學의 因子 및 平均流出速度를 고려하여 地形學의 定量分析과 表面流出을 理論적으로 結合시킨 地形學의 瞬間單位圖(Geomorphologic IUH)를 提案하였으며, 回歸分析을 통하여 瞬間單位圖의 尖頭流量과 到達時間을 Horton法則의 媒介變數로 나타내었다. Valdes等⁽¹⁶⁾은 Rodriguez-Iturbe와 Valdes가 提案한 GUH를 降雨-流出 實驗 모델로부터 구한 瞬間單位圖와 比較하였으며,

Gupta等⁽⁹⁾은 確率論의 接近方法에 의하여 瞬間單位圖를 流域의 地形學의 因子로 나타내었으며, Illinois의 3개 流域에 適用시킨 결과 實測值와의 不一致는 非線形效果에 基因한다고 밝혔다. Wang等⁽¹⁷⁾은 流域의 平均遲滯時間과 降雨強度와의 關係式을 提案하였으며, Cheng⁽¹⁾은 水路흐름에서의 貯留效果와 平行移動效果를 一定比로 나타내므로써 GUH를 誘導하였다. Rosso⁽¹³⁾는 GUH理論에 의한 Nash 모델의 再現性을 검토하므로써 그 理論의 妥當性을 보였다.

本 研究은 未計測流域에서의 單位圖合成을 위하여 1979年 Rodriguez-Iturbe와 Valdes가 提案한 GUH의 基本理論(以下 R-V理論이라 稱한다)을 導入하였으며, GUH理論의 實用化를 위하여 이의 主된 因子인 流出速度의 計算方法으로 平均流出速度 및 平均水路傾斜를 利用하는 方法을 提示하였다. 本 研究의 妥當性 檢證을 위하여 對象流域으로 IHP代表試驗流域인 慶安川, 無心川, 渭川流域을 選定하였으며, 假定된 損失率 및 增減된 平均流出速度를 變化시킴으로써 尖頭流量의 實測值와의 正確性 및 變化의 敏感性을 檢討分析하였다.

끝으로, 本 研究은 다음과 같은 假定下에 이루어졌음을 아울러 밝혀둔다.

(1) 排水流域의 地形學의 構造는 Strahler의 河川次數技法에 根據를 둔다^(1,6).

(2) 降雨粒子들은 統計적으로 서로 獨立의인 關係를 가진다^(1,6,12).

(3) 地表面에 내린 降雨는 直接流出로의 待機時間이 상당히 짧다고 생각되므로 平均流出速度는 地表水 흐름과 河川水 흐름을 同時 同一한 값으로 取扱한다⁽¹²⁾.

(4) 平均待機時間은 貯留常數와 같은 값을 갖는다⁽¹⁾.

2. 排水流域의 構造

河川形態學의 定量的 研究은 河川次數에 基本

을 둔 Horton의 經驗法則으로부터 시작되었다. Strahler⁽²⁾는 Horton의 次數法則을 修正하였으며, 修正된 Strahler의 次數法則過程은 다음과 같다.

(1) 1次河川은 支流를 가지지 않는 溪流를 뜻한다.

(2) i 次河川 2개가 만나면 $i+1$ 次河川이 된다.

(3) 서로 다른 次數의 河川이 만나면 2개 河川 次數 가운데 큰 次數를 維持한다.

次數法則過程에 의하여 全流域의 河川次數가 결정되면 各 河川次數別 河川數, 河川平均길이 및 河川平均傾斜를 求할 수 있다. Horton에 의하면 水系의 河川次數와 河川數, 各 次數 河川의 平均 길이 및 平均傾斜사이에는 式(1)~式(3)과 같은 法則이 성립한다고 提示한 바 있다.

$$\text{河川數의 法則 } \log_e N_i = C_1 - C_2 i \quad (1)$$

$$\text{河川平均길이의 法則 } \log_e L_i = C_3 - C_4 i \quad (2)$$

$$\text{河川平均傾斜의 法則 } \log_e \bar{S}_i = C_5 - C_6 i \quad (3)$$

윗 式에서 N_i , L_i 와 \bar{S}_i 는 各 河川數, 河川平均길이 및 河川平均傾斜를 나타내며, $C_1 \sim C_6$ 은 河域特性에 따르는 常數이고 分岐率, 河川길이比 및 河川傾斜比는 式(4)~式(6)과 같이 나타낼 수 있다고 알려져 있다.

$$\text{分岐率: } R_B = N_{i-1}/N_i = e^{-C_2} \quad (4)$$

$$\text{河川길이比: } R_L = L_i/L_{i-1} = e^{-C_4} \quad (5)$$

$$\text{河川傾斜比: } R_S = \bar{S}_i/\bar{S}_{i-1} = e^{-C_6} \quad (6)$$

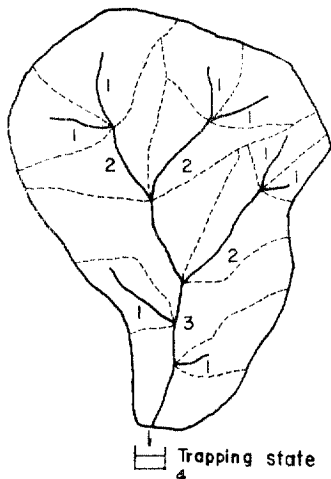


그림 1. Strahler의 次數法則에 따른 3次河川 流域

Schumm⁽²⁾은 Horton의 法則을 流域面積에 적용시켜 式(7)과 같은 法則을 提案하였다.

$$\text{河川平均面積의 法則 } \log_e \bar{A}_i = C_7 - C_8 i \quad (7)$$

윗 式에서 \bar{A}_i 는 i 次河川까지의 平均流域面積이며, 河川面積比는 式(8)과 같다.

$$\text{河川面積比: } R_A = \bar{A}_i/\bar{A}_{i-1} = e^{-C_8} \quad (8)$$

Smart⁽¹⁵⁾에 따르면 自然河川 流域에서 一般의 分岐率 R_B 는 3~5, 河川길이比 R_L 은 1.5~3.5, 河川面積比 R_A 는 3~6이 됨을 論한 바 있다.

本 研究에서는 流域의 地形學的 構造를 나타내기 위하여 Strahler의 次數法則을 擇하였으며, 이를 系統的으로 나타낸 것이 그림 1과 같다.

3. 地形學的 瞬間單位圖

3.1 $R-V$ 의 地形學的 瞬間單位圖概念

瞬間單位圖는 그림 1과 같은 流域에 統計의 由 서로 無關한 같은 크기의 數 많은 降雨粒子들이 瞬間의 由 내릴 경우, 이들이 流域의 出口에 到達하는 時間의 分布函數로서 式(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$IUH(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^t q(t) dt \quad (9)$$

Rodriguez-Iturbe와 Valdes⁽¹²⁾는 上記 概念의 單位圖를 위하여 連續 Markov 過程의 動的 確率理論을 導入하였으며⁽⁷⁾, 다음 사항을 정의 하므로써 無作爲로 擇한 降雨粒子가 任意時間 t 에서 流域의 出口에 到達하는 確率密度函數를 求하였다.

(1) 狀態(state)는 t 時間에 降雨粒子가 位置하고 있는 河川의 次數이며, 降雨粒子가 地表面에 놓여있는 경우 地表面에서 直接 排水되는 河川의 次數이다.

(2) 遷移(transition)는 한 狀態에서 다른 狀態로 移動하는 降雨粒子의 움직임이다.

(3) N 은 狀態의 數, 즉 $\Omega+1$ 이며, Ω 는 流域의 次數이다.

따라서 Ω 次河川 流域에서 連續 Markov 過程에 따른 N^2 遷移確率(transition probability)은 式(10)과 같은 $N \times N$ 遷移確率 매트릭스(matrix) P 로 나타낼 수 있다.

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{NN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1N} & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & \cdots & P_{2N} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P_{3N} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

윗 식에서 P_{ij} 는 降雨粒子가 i 次河川에서 j 次河川으로 遷移하는 確率이며, N 狀態는 出口를 나타낸다.

P 매트릭스는 降雨粒子가 出口까지 到達하는 過程에서 時間에 影響을 주는 動的特性을 나타내지 않는다. 流域에 내린 降雨粒子의 動的特性인 到達時間은 降雨粒子의 遲滯하는 時間, 즉 河川水路에서의 平均待機時間으로 定義할 수 있다.

그림 2는 3次河川流域의 概念的 模型이며, 降雨粒子가 1, 2, 3次 流域에 내릴 때 降雨粒子는 河川水路를 통하여 出口에 도달하게 된다.

i 次 河川에서의 無作爲變數인 平均待機時間은 λ_i 를 갖는 指數分布로 假定되었으며, 이 가정은 線形貯水池의 概念과 同一하다. 그러나 最高次 河川에서의 指數應答은 初期置가 0에서 시작되지 않는 全體 流域의 水文曲線을 나타내며, 瞬間單位圖의 初期 縱距値는 最高次 河川區域에서의 部分單位 衝擊應答函數의 縱距와 同一하므로 最高次 河川區域에서는 그림 2와 같이 3a 및 3b로 나누어 두개의 線形貯水池로 나타낸다. 3a狀態는 모든 2次 河川과 1次 河川의 一部 및 3次 河川으로 直接 流入하는 降雨粒子들이며, 모든 降雨粒子는 3b狀態를 거쳐 出口로 排水된

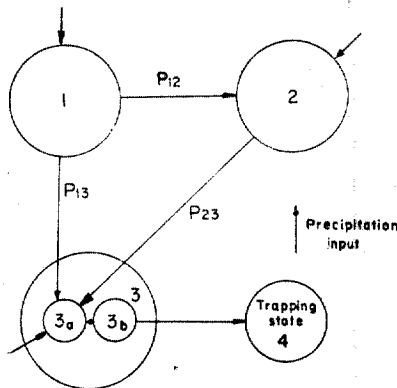


그림 2. 3次河川 流域의 概念的 模型

다.

3次 河川의 平均待機時間 λ_3^{-1} 은 3a狀態와 3b狀態에 同一하게 寄與하며, 待機時間 分布는 式 (11)과 같다.

$$w_3(t) = \mu^2 t e^{-\mu t} \quad (11)$$

윗 식에서 3次 流域 平均待機時間 λ_3^{-1} 의 平均値는 $2\mu^{-1}$ 이다.

그림 2와 같은 3次 流域에서 3a, 3b 및 出口를 각각 狀態 3, 4, 5라 하고 $R-V$ 理論에 따라 誘導된 瞬間單位圖는 式(12)와 같다.

$$\begin{aligned} IUH_3(t) &= \frac{d\pi_5(t)}{dt} = \pi_1(0) \frac{d\phi_{15}(t)}{dt} \\ &+ \pi_2(0) \frac{d\phi_{25}(t)}{dt} + \pi_3(0) \frac{d\phi_{35}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \phi_{15}(t) &= 1 + A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} + A_3 t e^{-\lambda_3^* t} \\ &+ A_4 e^{-\lambda_3^* t} \end{aligned}$$

$$A_1 = \lambda_3^{*2} (\lambda_1 P_{13} - \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1) (\lambda_3^* - \lambda_1)^2$$

$$A_2 = -\lambda_1 \lambda_3^{*2} P_{12} / (\lambda_1 - \lambda_2) (\lambda_3^* - \lambda_2)^2$$

$$A_3 = -\lambda_3^* (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_3^* P_{13}) / (\lambda_1 - \lambda_3^*) (\lambda_2 - \lambda_3^*)$$

$$\begin{aligned} A_4 &= \{-\lambda_1 \lambda_3^* P_{13} (\lambda_1 - \lambda_3^*) (\lambda_2 - \lambda_3^*) - (\lambda_1 \lambda_2 - \\ &\lambda_1 \lambda_3^* P_{13}) (3\lambda_3^{*2} - 2\lambda_1 \lambda_3^* - 2\lambda_2 \lambda_3^* + \lambda_1 \lambda_2)\} / \\ &(\lambda_1 - \lambda_3^*)^2 (\lambda_2 - \lambda_3^*)^2 \end{aligned}$$

$$\phi_{25}(t) = 1 + A_2 e^{-\lambda_2 t} + A_3 t e^{-\lambda_3^* t} + A_4 e^{-\lambda_3^* t}$$

$$A_2 = -\lambda_3^{*2} / (\lambda_3^* - \lambda_2)^2, A_3 = -\lambda_2 \lambda_3^* / (\lambda_2 - \lambda_3^*)$$

$$A_4 = \lambda_2 (2\lambda_3^* - \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_3^*)^2$$

$$\phi_{35}(t) = 1 + A_3 t e^{-\lambda_3^* t} + A_4 e^{-\lambda_3^* t}$$

$$A_3 = -\lambda_3^*, A_4 = -1$$

윗 식에서 λ_i 는 i 次河川에서의 平均待機時間의 逆數이며, λ_3^* 는 $2\lambda_3$ 이다. $\pi_5(t)$ 는 任意로 擇한 降雨粒子가 t 時間 또는 t 時間 以前에 狀態 5인 出口에 到達하는 確率인 狀態確率(state probability)이다. $\pi_i(0)$ 는 初期確率로서 降雨粒子의 遷移過程이 i 次河川에서 始作되는 確率이며, $\phi_{i5}(t)$ 는 瞬間적으로 i 次河川에 내린 降雨粒子가 t 時間에 出口에 到達하는 確率인 間隔遷移確率(interval transition probability)이다.

本 研究에서는 河川次數가 3~5次 内外로서, 流域面積이 數百 km² 以內的 河川流域에서도 流出解析을 할 수 있도록 前述한 $R-V$ 理論에 의하여 4次, 5次 河川 等의 高次河川 流域에서의 IUH를 誘導하였다.

3.2 地形學的 因子

R-V 理論에 의해誘導된 IUH는 降雨粒子的 遷移確率 P_{ij} , 初期確率 $\pi_i(0)$ 및 平均待機時間의 逆數 λ_i 로 構成되어 있다. 河川流域의 地形學的 構造가 Strahler의 次數法則을 따른다면 IUH의 遷移確率 P_{ij} 와 初期確率 $\pi_i(0)$ 는 地形學的 因子로 나타낼 수 있다.

그림 1과 같은 3次 流域에서 地表面에서의 流出을 S_i , 河川水路에서의 流出을 C_i 라 하면 流域에 내린 降雨粒子가 움직이는 經路는 式(13)과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{經路(1)}; S_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \\ \text{經路(2)}; S_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \\ \text{經路(3)}; S_2 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \\ \text{經路(4)}; S_3 \rightarrow C_3 \end{array} \right\} \quad (13)$$

1次 河川流域에 내린 降雨粒子的 數, 즉 初期確率 $\pi_i(0)$ 는 經路(1)과 經路(2)를 통하여 최종 出口에 도달하며, 1次 河川에 流入된 降雨粒子는 遷移確率 P_{12} 및 P_{13} 에 따라 2次 河川과 3次 河川으로 나누어져 流入되므로 遷移確率 P_{ij} 와 初期確率 $\pi_i(0)$ 는 式(14)와 式(15)와 같이 地形學的 因子로 나타낸다.

$$P_{ij} = \frac{j \text{次 河川과 合流하는 } i \text{次 河川의 數}(N_{ij})}{i \text{次 河川의 總數}(N_i)} \quad (14)$$

$$\pi_i(0) = \frac{i \text{次 河川으로 직접 流入하는 } i \text{次 河川의 流域面積}(A_i^*)}{\text{全 流域面積}(A)} \quad (15)$$

式(13)에서의 各 經路를 γ_i 라 하면, 降雨粒子가 이 流出經路를 택하는 確率은 式(16)과 같다.

$$P(\gamma_i) = \pi_i(0) \times P_{S_i C_i} \times \prod P_{ij} \quad (16)$$

윗 式에서 $P_{S_i C_i}$ 는 降雨粒子가 i 次 地表面流域에서 i 次 河川으로 움직이는 遷移確率로 값은 1이며, \prod 는 多重곱의 演算記號이다.

3.3 平均待機時間

流域特性因子들과 함께 地表面흐름(overland flow)과 水路흐름의 水理學的 特性은 瞬間位圖의 形態를 決定하게 된다. 瞬間單位圖의 構成成分들은 上記 두 흐름成分들로 이루어져 있으며, 流域特性因子들은 自動的으로 이 두 成分들로서 組合된다. 따라서, 물의 水理學的 動的 特性을 알기 위해서는 이들이 취급되어야 하겠으며,

流體의 水路上的 平均流速은 이의 代表的인 要素中の 하나이다. 平均流速은 流出이 水路의 出口點에서 排出되기까지의 水路上에서 滯滯하는 時間의 概念을 內包하게 되며, 一般的으로 이를 平均待機時間(mean waiting time)이라고 일컫고 있다^(1, 6, 12).

R-V 理論의 瞬間單位圖에서 平均待機時間은 線形貯水池 概念과 同一한 λ_i 를 갖는 指數分布에 따른다고 가정되었으므로 λ_i 를 求하기 위하여 線形貯水池 概念을 適用시키면 式(17)과 같다⁽¹²⁾.

$$S = KQ \quad (17)$$

윗 式에서 K 는 貯留係數이며, 貯水池에 의해 流入量에 영향을 끼치는 平均滯滯時間이다. 두 개의 同一한 貯水池의 경우에 첫번째 貯水池로부터의 流出量은 두번째 貯水池의 流入量이 되며, 두번째 貯水池의 流出量 $u(0, t)$ 는 式(18)과 같다.

$$\begin{aligned} u(0, t) &= \int_0^t \frac{1}{K} e^{-\tau/K} \frac{1}{K} e^{-(t-\tau)/K} d\tau \\ &= \frac{t}{K^2} e^{-t/K} \end{aligned} \quad (18)$$

윗 式에서 $u(0, t)$ 의 0는 單位貯留量의 瞬間的인 流入을 뜻하며, $\frac{1}{K}$ 은 R-V 理論의 λ 와 一致한다. 그러므로 λ_i 는 幅이 一定한 直四角型 水路를 생각하면 쉽게 求할 수 있다⁽¹⁾. 따라서 i 次 河川에서의 平均待機時間 λ_i^{-1} 은 式(19)와 같다.

$$\lambda_i^{-1} = \frac{L_i}{V_i} \quad (19)$$

式(19)에서 L_i 는 i 次 河川의 平均길이이고, V_i 는 i 次 河川의 平均流出速度이다.

式(19)에서의 平均待機時間을 계산하기 위하여 平均流出速度의 算定이 필요하며, 本 研究에서는 두가지 方法을 使用하였다. 첫번째는 平均水路傾斜를 이용하는 方法이며, 두번째는 Rodriguez-Iturbe와 Valdes가 試圖한 바와 같이 全流域에서의 流速이 一定하다고 가정하여 平均流出速度를 求하는 方法이다.

開水路에서의 一般的인 平均流速公式은 式(20)과 같다^(3, 14).

$$V = C_1 R^a S^b \quad (20)$$

윗 식에서 C_1 은 常數, R 은 動水半徑, S 는 水路傾斜이다. a 와 b 는 指數이며, 指數 b 는 Chezy 公式 또는 Manning 公式의 경우 1/2 이므로 式(20)은 式(21)과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$V = C_1 S^{1/2} \quad (21)$$

윗 식에서 C_1 는 水路斷面의 通水能이며, 윗 식을 이용하면 i 次河川에서의 平均流出速度는 式(22)와 같다.

$$V_i = C_1 \bar{S}_i^{1/2} \quad (22)$$

윗 式의 \bar{S}_i 는 i 次河川의 平均水路傾斜로서 地形圖로부터 求할 수 있다. C_1 는 式(20)에서와 같이 動水力學으로부터 얻을 수 있으나, 地形圖上에서 河川 斷面資料의 획득이 어려우므로 本 研究에서는 降雨柱狀圖와 直接流出 水文曲線으로부터 求하였다.

各 次數河川에서의 平均待機時間의 總合은 流出이 流域內 水路上에서 遲滯하는 時間과 同一하므로 式(23)으로부터 C_1 를 求할 수 있다⁽²⁾.

$$\begin{aligned} \bar{t}_{IUM1} &= \bar{t}_{DRH1} - \bar{t}_{BRH1} \\ &= \sum_i P(\gamma_i) \left\{ \sum_{k=i}^n \frac{L_k}{C_1 \bar{S}_i^{1/2}} \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

윗 式에서 \bar{t}_{IUM1} 은 瞬間單位圖의 1次모멘트, \bar{t}_{DRH1} 은 直接流出 水文曲線의 1次모멘트, \bar{t}_{BRH1} 은 有效降雨柱狀圖의 1次모멘트이고, $P(\gamma_i)$ 는 降雨粒子가 流出徑路 i 를 擇하는 確率이다.

全流域에서의 平均流出速度가 一定하다고 假定하면 式(19)의 平均待機時間 λ_i^{-1} 은 式(24)와 같이 변형된다.

$$\lambda_i^{-1} = \frac{L_i}{\bar{V}} \quad (24)$$

式(24)에서 \bar{V} 는 全流域에서 一定한 平均流出速度이며, 式(25)로부터 求할 수 있다.

$$\bar{t}_{IUM1} = \sum_i P(\gamma_i) \left\{ \sum_{k=i}^n \frac{L_k}{\bar{V}} \right\} \quad (25)$$

上記 遲滯時間 및 平均流出速度를 求하기 위하여 水文曲線分離가 이루어져야 한다. 總流出量으로부터 基底流量을 分離하기 위한 方法으로는 하나의 尖頭流量을 가지는 水文曲線과 두 개 이상의 尖頭流量을 가지는 경우에 대하여 處理過程이 相異할 수 있겠으나, 이의 解析은 本 研究對象의 범위를 벗어나는 것으로서 前者의 경우에만 局限하였다. 基底流量의 分離를 위한

여러 方法論들이 지금까지 널리 알려져 왔으나, 本 研究에서는 傾斜急變點法을 利用한 直線分離 方法을 擇하였다^(9,10). 이와 같은 方法으로 求한 直接流出量으로부터 水文曲線의 上昇部 起點까지의 雨量을 初期損失로 취하고, 그 以後의 損失量은 一定損失率로 假定하는 一定比損失雨量法을 利用하여 損失雨量과 有效雨量을 分離하였다. 이와 類似한 方法을 Liu와 Brutsaert⁽¹⁰⁾가 降雨와 流出解析에 이미 適用한 바 있다.

4. 適用例 및 檢討分析

4.1 對象流域 및 資料

地形學의 瞬間單位圖의 適用을 檢討하기 위하여 IHP 代表試驗流域인 漢江水系의 慶安川流域, 錦江水系의 無心川流域, 洛東江水系의 渭川流域을 對象流域으로 選定하였다.

慶安川 및 無心川 代表流域은 流域面積이 9.2 km² 및 20 km² 이며 最長流路延長은 5.0 km 및 4.6 km 의 4次 河川流域이다⁽¹⁸⁾.

渭川 代表流域은 경상북도 군위군에 위치하고 있으며 流域面積은 472.53 km², 最長流路延長은 42.83 km 인 流域으로서 水位觀測地點에 따라 6개의 小流域으로 나누어져 있다. 本 研究에서 選定한 小流域은 東谷橋地點 및 古老橋地點 流域으로서 東谷橋地點은 流域面積이 33.63 km², 最長流路延長은 8.0 km 의 4次 河川流域이며, 古老橋地點은 流域面積이 109.73 km², 最長流路延長이 18.9 km 의 4次 河川流域이다⁽¹⁸⁾.

渭川流域에서 水文學의 觀測은 1982년부터 實施되었으며, 1983年~1985年의 降雨事象들을 IHP 報告書로부터 擇하였다. 1972年부터 觀測이 實施되어 1980年에 완료된 慶安川 및 無心川流域의 경우에는 1976年 IHP 報告書에 수록된 資料들을 使用하였다.

4.2 地形學의 因子分析

對象流域의 地形學의 因子를 調查하기 위하여 慶安川 및 無心川流域은 1/25,000 地形圖, 渭川流域은 1/50,000 地形圖를 使用하였다. 本 研究에서 Strahler 次數法則을 適用하여 分析한 地形學의 因子는 表 1~4 와 같다.

4.3 水文曲線分析

本 研究에서의 適用對象流域은 4次流域이며,

表 1. 慶安川流域의 地形學的 因子

因子	河川次數	1	2	3	4
河川數, N_i		19	6	3	1
河川平均길이, \bar{L}_i (m)		482	548	627	2,038
河川平均傾斜, $\bar{S}_i(\times 10^2)$		14.68	4.91	2.94	1.00
河川平均面積, $\bar{A}_i(\text{km}^2)$		0.233	0.986	2.381	9.200
初期確率, $\pi_i(0)$		0.482	0.255	0.094	0.169

表 2. 無心川流域의 地形學的 因子

因子	河川次數	1	2	3	4
河川數, N_i		28	7	2	1
河川平均길이, \bar{L}_i (m)		749	911	3,295	100
河川平均傾斜, $\bar{S}_i(\times 10^2)$		17.19	6.35	2.49	1.00
河川平均面積, $\bar{A}_i(\text{km}^2)$		0.433	1.632	9.954	20.000
初期確率, $\pi_i(0)$		0.606	0.178	0.211	0.005

表 3. 渭川(東谷橋)流域의 地形學的 因子

因子	河川次數	1	2	3	4
河川數, N_i		27	7	2	1
河川平均길이, \bar{L}_i (m)		708	1,646	2,410	3,090
河川平均傾斜, $\bar{S}_i(\times 10^2)$		18.23	6.32	3.56	1.10
河川平均面積, $\bar{A}_i(\text{km}^2)$		0.616	3.549	10.431	33.630
初期確率, $\pi_i(0)$		0.494	0.311	0.119	0.076

表 4. 渭川(古老橋)流域의 地形學的 因子

因子	河川次數	1	2	3	4
河川數, N_i		110	24	8	1
河川平均길이, \bar{L}_i (m)		754	1,322	2,460	13,990
河川平均傾斜, $\bar{S}_i(\times 10^2)$		14.71	6.34	2.38	0.69
河川平均面積, $\bar{A}_i(\text{km}^2)$		0.582	3.068	9.451	109.730
初期確率, $\pi_i(0)$		0.584	0.207	0.123	0.086

地形圖로부터 求한 地形學的 因子와 計算된 流出速度로 GUH를 決定한 後 이를 利用하여 流出水文曲線의 尖頭流量 및 到達時間을 求하였다. GUH는 두가지 流出速度의 計算方法, 즉 平均水路傾斜와 平均流出速度를 利用하는 方法에 의해서 各各 分析되었다. GUH로부터 直接 流出量을 求한 後, 이로부터 基底流出量을 合算한 流出量(分析值)과 實測值을 比較한 것이 表 5와 그림 3~4와 같다.

表 5에서 提示한 바와 같이 平均流出速度로부터 求하여진 尖頭流量은 實測值와 分析值의 誤

差들이 慶安川 및 無心川流域의 경우 4% 以內, 渭川流域의 경우 14% 以內의 만족스러운 結果를 나타내었으나, 無心川流域의 降雨事象 3番의 경우 26%의 誤差를 나타내었다.

4.4 損失率 및 遲滯時間 變化와 尖頭流量 敏感度

水文曲線의 解析에 있어서 降雨의 損失率은 降雨特性이나 土壤條件 등과 같은 水文氣象學的 및 流域特性 因子들에 의하여 左右되어지므로 正確한 값을 期待하기란 상당한 어려움을 內包하게 된다. 降雨로부터 損失率의 正確한 分離란 直接流出量과 直接的으로 關係가 되어지는 것이

表 5. 實測值와 分析值와의 比較

流域 및 降雨事象	實測值 $Q_0(m^3/s)$	分析值 $Q_1(m^3/s)$		實測值 $T_0(hr)$	分析值 $T_1(hr)$		遲滯時間 (hr)
		平均 水路傾斜	平均 流出速度		平均 水路傾斜	平均 流出速度	
慶安川 1	19.53	19.48	19.41	5	7	8	6.47
	2	9.06	9.48	9.40	8	10	11
無心川 3	11.00	14.80	13.84	16	16	17	12.73
	4	12.00	11.97	11.60	10	11	11
渭川(東谷橋) 5	14.90	15.40	15.16	9	13	13	4.65
	6	17.00	18.71	18.50	12	13	13
7	27.58	26.19	25.94	4	7	7	5.39
	8	11.82	13.61	13.42	10	10	10
9	15.35	15.27	15.11	16	16	16	15.84
	10	16.22	17.71	17.49	11	13	13
渭川(古老橋) 11	107.05	92.08	94.57	8	11	11	5.95
	12	35.89	32.34	33.57	14	13	15
13	104.39	95.45	98.68	6	9	9	7.83
	14	29.88	32.21	33.23	12	15	16
15	29.07	24.43	25.32	17	16	17	18.83

表 5에서 Q 는 尖頭流量의 크기, T 는 尖頭流量의 到達時間을 나타낸 것이며, 添字 0와 s는 實測值와 分析值를 各各 뜻한다.

므로 이의 正確性은 降雨와 流出解析에 있어서 다른 事項들보다 切實함을 보여준다. 따라서, 本 研究에서는 3.3節에서 言及된 바 있는 基底流出分離法을 適用하여 不確實한 直接流出의 끝點을 流出水文曲線의 後尾部分上에 여러 點을 取하므로써 各 경우에 대한 直接流出容積을 求하고, 이들로부터 前述한 方法에 의하여 各 경우에 該當되는 有效雨量을 算定하였다. 이들을 各 경우별로 圖示한 것이 그림 5와 같다.

獲得된 各 경우의 水文量과 GUH로부터 尖頭流量을 求한 後, 各 경우에 대한 이들의 敏感度를 把握하고 實測值와의 相對的 誤差를 檢討 分析하였다. 또한 GUH의 時變性을 論해 주기 위하여 平均流出速度를 變化시켜 이들로부터 算定된 尖頭流量(分析值)과 實測值와의 比較檢討 하였다. 平均流出速度를 變化시키는 것은 各 降雨事象에 대한 遲滯時間의 變化性을 意味하게

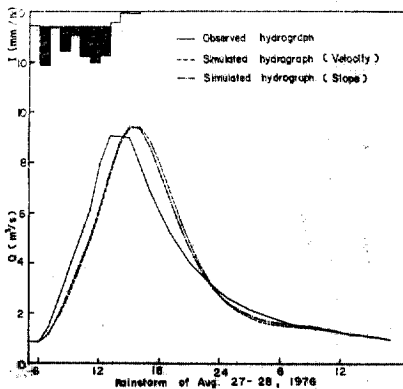


그림 3. 實測值와 分析值의 流出水文曲線, 慶安川流域 (降雨事象 2番)

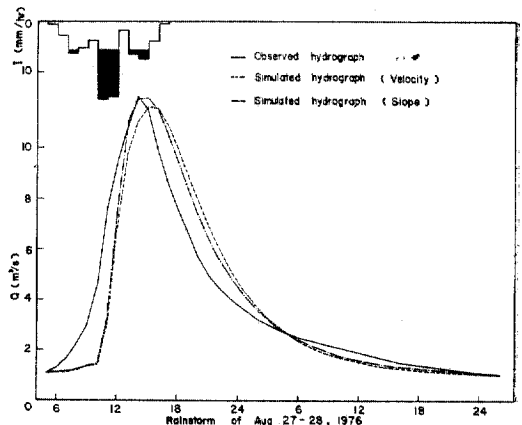


그림 4. 實測值와 分析值의 流出水文曲線, 無心川流域 (降雨事象 4番)

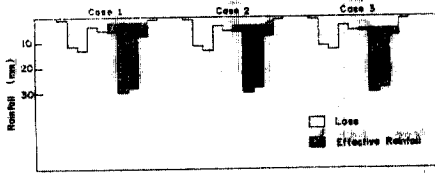


그림 5. 假定된 損失率에 따른 有效雨量, 慶安川流域 (降雨事象 1)

된다.

遲滯時間은 一般적으로 有效降雨柱狀圖의 中心과 直接流出水文曲線의 中心과의 時間길이로 定義되며, 이는 流域의 크기, 길이, 水路의 密度, 平均傾斜 等の 形態學의 特性因子들과 先行 含水比, 平均水深, 降雨強度와 이의 時間的 및 空間的 分布 等の 條件들에 의하여 決定되어진다⁽⁴⁾.

表 5에서 나타난 바와 같이, 遲滯時間은 同一한 流域에서도 降雨事象에 따라 상당한 差異가 發生되고 있음을 알 수 있다. 本 研究에서 適用된 GUH는 遲滯時間을 媒介變數로 한 平均流出速度에 의하여 決定되기 때문에, 이의 變化는 바로 GUH의 變化를 뜻한다. 그러나 實際의인 適用面에서 降雨事象別 時變的인 GUH를 決定한다는 것은 많은 어려움을 內包하게 되므로, 流域의 形態學의 特性因子들을 고려하여 近似的으로 代表值를 求하고 있는 實情이다. 이와 같은 觀點下에서 本 研究에서는 平均流出速度에 따른 GUH의 時變性을 把握하고, 各 경우의 GUH가 尖頭流量에 미치는 程度를 論해주므로써 水文學의 物理的 意味를 얻고자 하는데 있다.

平均流出速度의 變化는 各 狀態에서의 平均待機時間의 變化와 同一하므로 平均流出速度가 50% 減少하면 平均待機時間은 2倍로 增加되며, 平均流出速度가 50% 增加하면 平均待機時間은 1/3이 減少된다. 그림 6은 慶安川流域(降雨事象 1番)의 平均流出速度를 50% 增減시키므로써 一定損失率의 變化에 따른 尖頭流量의 相對的 誤差를 圖示하였다. 平均流出速度를 增加시키면 尖頭流量이 增加하는 現象을 나타내며, 尖頭流量의 相對的 誤差는 一定損失率의 變化보다는 平均流出速度에 크게 左右됨을 알 수 있었다.

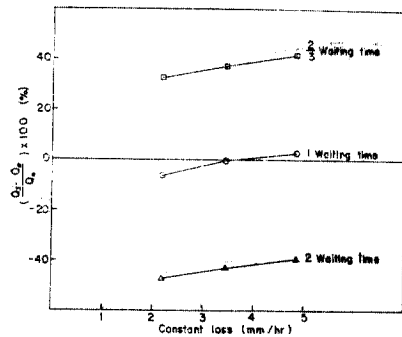


그림 6. 平均待機時間과 一定損失率에 따른 尖頭流量의 相對的 誤差, 慶安川流域(降雨事象 1番)

以上の 結果를 要約해 보면, 비록 直線分離法을 使用하더라도 豫測된 尖頭流量에는 큰 誤差를 發生시키지 않았으며, 이의 結果는 流出豫測面에서 상당히 기여할 수 있으리라 판단된다. 平均待機時間, 즉 遲滯時間의 變化는 尖頭流量에 큰 變化를 誘發시키므로, 앞으로 보다 많은 資料들을 分析하여 遲滯時間과 水文學의 特性因子들과의 相關性을 論해 주는 關係式이 開發되어야 하겠다.

5. 結 論

本 研究를 통하여 얻어진 結果는 다음과 같다.

(1) 流域의 水文應答函數인 瞬間單位圖를 地形圖로부터 얻은 地形學的 因子와 平均流出速度로 나타낼 수 있으며, 3次 以上の 河川流域에서 이의 適用可能性을 確認할 수 있었다.

(2) 地形學的 瞬間單位圖를 利用하여 對象流域의 入力降雨量과 模擬發生시킨 流出量은 實測值와 상당히 近似하게 나타났다.

(3) 流出水文曲線의 尖頭流量 및 到達時間推定에서 平均水路傾斜와 平均流出速度를 利用한 兩方法의 結果들은 서로 近似한 값을 보이므로, GUH의 決定方法으로서의 간략법인 平均流出速度의 利用이 勸奨된다.

(4) 平均流出速度의 增加는 尖頭流量의 크기를 增加시킴을 알 수 있었다.

(5) 尖頭流量의 敏感性은 一定損失率보다는 平均流出速度에 크게 左右됨을 알 수 있었다.

(6) 本 研究의 一般化를 위하여는 앞으로 流

域의地形學的因子들과遲滯時間과의相關式이開發되어야 할뿐만 아니라,地表水흐름을分離取扱한內容으로擴張되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Cheng, B.L., "A Study of Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph," Ph.D. Thesis, University of Illinois, 1982.
2. Chow, V.T., "Handbook of Applied Hydrology," McGraw-Hill Book Co., 1964.
3. Chow, V.T., "Open Channel Hydraulics," McGraw-Hill Book Co., 1959.
4. Diskin, M.H., "The Role of Lag in a Quasi-linear Analysis of the Surface Runoff System," *Proceedings of the Second International Symposium in Hydrology, Water Resour. Pub.*, Fort Collins Colorado, pp.133~144, 1973.
5. Gregory, K.J. & D.E. Walling, "Drainage Basin Form and Process-A Geomorphological Approach," Edward Arnold, 1973.
6. Gupta, V.K., E.D. Waymire & C.T. Wang, "A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphology," *Water Resour. Res.*, 16(5), pp.855~862, 1980.
7. Howard, R.A., "Dynamic Probabilistic Systems." John Wiley, 1971.
8. Kennedy, R.J. & W.E. Watt, "The Relationship between Lag Time and the Physical Characteristics of Drainage Basins in Southern Ontario," *Inter. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.*, 85, pp.866~874, 1967.
9. Linsley R.K., M.A. Kohler & J.L.H. Paulhus, "Hydrology for Engineers," 3rd. Ed., McGraw-Hill Book Co., 1982.
10. Liu, C.C-K. & W.Brutsaert, "A Nonlinear Analysis of the Relationship between Rainfall and Runoff for Extreme Floods," *Water Resour. Res.*, 14(1), pp.75~83, 1978.
11. Raudkivi, A.J., "Hydrology, an Introduction to Hydrological Process Modelling," Pergman Press, 1979.
12. Rodriguez-Iturbe, I. & J.B. Valdes, "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response," *Water Resour. Res.*, 15(6), pp.1409~1420, 1979.
13. Rosso, R., "Nash Model Relation to Horton Order Ratios," *Water resour. Res.*, 20(7), pp.914~920, 1984.
14. Singh, K.P., "A Non-Linear Approach to the Instantaneous Unit-Hydrograph Theory," Ph.D. Thesis, University of Illinois, 1962.
15. Smart, J.S., "Channel Networks," *Advanced in Hydroscience*, 8, pp.305~346, 1972.
16. Valdes, J.B., Y. Fiallo & I.Rodriguez-Iturbe, "A Rainfall-runoff Analysis of the Geomorphologic IUH," *Water Resour. Res.*, 15(6), pp.1421~1434, 1979.
17. Wang, C.T., V.K. Gupta & E.Waymire, "A Geomorphologic Synthesis of Nonlinearity in Surface Runoff," *Water Resour. Res.*, 17(3), pp.545~554, 1981.
18. 건설부, 국제수문개발계획(IHP) 대표시험유역 연구조사보고서, 1975, 1976, 1982, 1983, 1984, 1985.

(接受 : 1986. 11. 24)