

<論文>

閉線形系로 본 流域代表 單位流量圖의 誘導를 위한 알고리즘의 開發에 關한 研究

A Study on the Development of Algorithm for the Representative Unit Hydrograph of
a Watershed as a Closed Linear System .

金 再 韓*

Kim Jae Han

李 元 煥**

Lee Won Hwan

ABSTRACT

An algorithm is developed to derive a representative 1 hr-unit hydrograph through an analysis of rainfall-runoff relations of a watershed as a closed system. For the base flow separation of a flood hydrograph the multi-deflection method is proposed herein, which gave better results compared with those by the existing empirical methods.

A modified Φ index method is also proposed in this study to determine the time distribution rainfall excess of a rainstorm, which is essentially a modification of the commonly used Φ index method of rainfall separation. With the so-obtained rainfall excess hyetograph and the direct runoff hydrograph a trial and error computation of the ordinates of 1 hr-unit hydrograph was executed in such a manner that the synthesized flood hydrograph closely approximates the observed one, thus resulting a unit hydrograph of a piecewise exponential function type.

To verify the validity of this study the 1 hr-unit hydrographs for the Imha and Dongchon in Nagdong River basin, and Yongdam in Geum River basin were derived by this algorithm, and the results were compared with those by the conventional synthetic unit hydrograph method and the Nakayasu method. Besides, the validity of this study was also tested by comparing the observed hydrograph with the one computed by applying the unit hydrograph to a specific rainfall event.

To generalize the result of this study a computer program, consisted of a main and three sub-programs (for rainfall excess estimation, convolution summation, and sorting), is developed as a package, which is believed to be applicable to other watersheds for the similar purpose as those in this study.

要 旨

本 研究는 流域을 閉線形系로 본 降雨와 流出間의 解析으로 부터 1時間代表單位流量圖를 誘導하기 위한 알고리즘을 開發한 것이다.

單位圖 誘導에 必要한 基底流出과 直接流出의 分離는 本 研究에서 開發된 多變屈曲法에 의하였으며, 從來의 方法들에 비해 比較的 좋은 結果를 주었다.

超過雨量의 算定을 위해서는 Φ index 法의 概念을 各 時間別로 適用하는 修正 Φ index法을 開發 適用함으로써 從來의 Φ index 法의 弱點을 補完할 수 있었다.

이와 같은 方法으로 直接流出과 이에 相應하는 超過雨量을 決定한 後 各 豪雨集團別로 1時間單位圖의 時

* 本学会 正會員 忠南大學校 工業教育大學 土木教育工學科 助教授(工博)

** 本学会 副會長 延世大 工大 教授(工博)

間別 縱距를 試算에 의해 決定하되 觀測水文曲線을 再演토록 함으로써 區間別 指數函數形의 單位圖를 誘導하였다.

本 研究의 妥當性 檢定을 위하여 洛東江의 臨河 및 東村 地点과 錦江의 龍潭 地点의 1時間代表單位圖를 誘導하고 그 結果를 合成單位圖法 및 Nakayasu 方法에 의한 結果와 北較 檢討하였으며, 單位圖의 誘導에 使用하지 않은 豪雨事象에 對하여 誘導된 1時間 代表單位圖를 適用함으로써 觀測值와 算定值를 北較하였다.

本 解析의 一般化를 위하여 主 프로그램과 3개의 副 프로그램(超過雨量 算定, 回旋累積, 크기配列)으로 構成되어진 컴퓨터 프로그램을 開發하였으며, 이 프로그램은 他 流域에 그대로 適用이 可能토록 되어 있다.

1. 序 論

降雨로부터 流出解析은 該當流域에서 單位圖가 作成되어지면 他 方法보다 쉽게 行하여질 수 있다. 그러나 單位圖 誘導를 위해서는 流域內 信憑性이 높은 많은 資料가 存在하여야만 하고, 資料數가 充分하더라도, 이의 解析을 위하여 隨半되는 各種 近似式, 즉 超過雨量 및 基底流出과 直接流出 分離 方法등이 實際 값에 近似하지 못하면 많은 誤差를 包含하게 되어 實際 單位圖 모양과 같은 미끈한 水文曲線을 期待하기란 어렵다.

따라서 本 研究에서는 現在까지 紹介되고 있는 各種 方法을 토대로 하여 流域內 現存하고 있는 資料에 의거 實際 水文曲線과 같은 單位圖를 經驗的이 아닌 解析的 解法에 의하여 求하고, 이의 實用化를 위한 알고리즘을 개발한다.

研究範圍로는 水文資料 및 解析上에서 發生되는 各種 誤差로 因하여 離散形 線形論에 의한 單位圖 縱距들은 심한 凹凸을 發生시키므로 이의 凹凸部分 解決을 試圖하고, 또한 直接流出과 基底流出 分離는 現在 紹介되고 있는 方法을 引用 變化시키므로써 可及的 誤差를 줄이고자 하였다.

이와 같이 하여, 各 豪雨集團別 誘導된 1時間單位圖들로부터 이미 發表되어진 式을 引用하여 代表單位圖를 誘導한다.

本 研究와 關聯된 研究動向을 살펴보면, 1930年 以前에는 降雨와 流出 關係 解析은 電子計算機와 같은 高速度의 計算이 不可能하였기 때문에 주로 合理式과 類似한 經驗式의 開發이 活發하였다.

1907年 Gregory⁽¹⁾가 暴雨集에 대한 合理式과 類似한 式을 發表하였으며, 1914年 Justin⁽²⁾이 降雨資料로부터 圖式的 解法을 紹介하였고, 1922年 Grunsky⁽³⁾는 降水로부터 流域의 特性因子와 氣候를 考慮한 流出關係를 誘導하였다.

1930年 부터는 經驗式에서 解析的 解法으로 變遷하

는 過渡期라 할 수 있겠다. 1932年 Gregory와 Arnold⁽⁴⁾가 流出과 合理式에 대하여 論하였으며, 또한 Sherman이 지금까지 잘 알려진 單位流量圖에 대하여 研究發表함으로써, 같은 해에 經驗式과 解析的 解法이 抬頭되고 있음은 過渡期의 現象을 한마디로 잘 말해주고 있다. 1940年 Meyer⁽⁵⁾가 流域特性이 비슷한 地域의 流出記錄으로부터 記錄이 부족한 流域의 水文曲線을 誘導 提示해 주므로써, 임의의 流域들로 부터 誘導된 式들에 의하여 他地域과 相關性을 論하므로 解析이 可能함을 立證하였다.

이후 계속적인 研究로 1960年代에 이르러 컴퓨터의 技術과 數學的 計劃技法의 急激한 發展으로 最適化 理論의 各種 解法이 發表되었다. 1960年度 後半期에는 주로 媒介變數에 대한 最適化 理論이 盛行되게 되었다. 이의 研究로는 Snyder⁽⁶⁾ 및 Brakensiek와 Onstad⁽⁷⁾가 있으며, 또한 媒介變數 理論은 統計的 概念으로도 處理되었는데, Frind⁽⁸⁾ 및 Wilson과 Kiradar⁽⁹⁾의 流出豫報式이 이 分類에 屬한다. 이 當時 Viessman⁽¹⁰⁾은 대단히 작은 流域에서 1分單位流量圖 適用 可能性의 立證과 流出算定을 紹介함으로써, 瞬間 單位流量圖 可能性을 抬頭시켰다.

이후 1970年度 直前の 降雨와 流出解析에 Nordin과 Rodriguez-Iturbe⁽¹¹⁾의 Cross-spectral解法, Yen과 Chow⁽¹²⁾의 移動暴雨로 發生되는 降雨와 流出關係 糾明, Botson, Tucker과 Haller⁽¹³⁾의 圖式的 API에 대한 解析的 方法 등으로 그 解析 方法이 多様하다.

1970年代에는 系分析(System analysis)이 本格的으로 發展된 時代라 하겠다. 系分析으로는 線形系와 非線形系 解析을 들 수 있으나 本 研究의 內容上 線形系의 研究動向을 살펴 보면 다음과 같다.

Eagleson⁽¹⁴⁾이 微分方程式을 利用하였으나, Rao와 Delleur⁽¹⁵⁾는 約 5miles² 이내의 작은 流域에서 線形的 解析이 상당한 正確性을 가지고 있음을 提示하였고, 또한 上記 流域에서는 Fourier 變換에서 求한 応答函

수와 하나의 線形貯水地 모형에 의하여 얻어진 瞬間單位流量圖가 同一하다는 結論을 얻었다. Snyder와 Asmussen⁽¹⁶⁾은 線形豪雨와 水文曲線 解析에서의 水文曲線 指數形的 減水曲線인 狀態函數(state function)中 巔數의 媒介變數에 대한 最適值를 回歸方程式에 의해 計算하였으며, Williams⁽¹⁷⁾는 無次元 單位流量圖의 上昇部 지점에서 부터 尖頭以後 變曲點까지의 水文曲線을 두개의 媒介變數 감분布方程式에 의하여 算定함으로써, 直接的으로 測定되지 않을 수 없는 水文學的 變數들을 計算하는 最適化 技法을 개발하였다. Liu와 Brutsaert⁽¹⁸⁾는 Chemung 江流域의 Tioga 集水地에서 大洪水時 Volterra 級數의 積分方程式 項으로 系를 公式化시킴으로써 Chebyshev 多項式 展開에 의하여 核數值近似(numerical approximation of kernels)를 設定하였다. O'Connor⁽¹⁹⁾는 一般的인 入出力 경우와 自色雜音 人力의 特別한 경우에 대한 模型媒介變數의 直接的인 算定을 위한 方程式을 誘導設定코자 不連續 線形 人工暴布 모형을 試圖한 바 있고, Blank, Deller⁽²⁰⁾는 核函數 誘導을 위하여 Fourier 및 Laplace gamma transforms 와 直接的인 回旋積分에 의하여 삼자를 비교 考察함으로써 核函數(kernel function)에서 縱距의 凸凹部分을 處理하였으며, Fujita(藤田)⁽²¹⁾는 Laplace 및 Fourier 變換에 의한 核函數 誘導을 위한 解析方法을 紹介한 바 있다.

와 같이 降雨과 流出解析에서 線形系 理論에 의한 核函數 誘導을 위하여 最適近似解法이 試圖되어오던 바, 1975 年에 Papazafiriou⁽²²⁾가 流域을 하나의 black box로 取扱하는 閉線形系의 理論을 대두시키므로써 直交多項式과 調和解析에 의하여 指數型的 相當히 미끈한 核函數를 誘導하는 曲線推定法(curve fitting method)이 提示되었다.

우리나라의 경우 核函數에 대한 理論으로서, 最近 李⁽²³⁾는 韓國 主要 水系의 小流域에 대한 瞬間單位流量 推定方式이 線形模型에 의한 때 좋은 結果가 誘導될 수 있음을 立証하였다. 尹과 鮮⁽²⁴⁾는 漢江 및 錦江流域에서의 Clark 方法에 의한 瞬間單位函의 誘導方法을 論하고 流域別 合成單位流量圖를 誘導한 바 있다.

降雨과 流出解析은 아나나 河川호를 豫報式을 尹⁽²⁵⁾이 線形系 理論에 의하여 誘導한 바 있다.

이와같이 降雨과 流出解析에 最近 系分析의 研究가 活発히 進行되고 있으며, 本 研究에서도 代表單位函 誘導를 確定論的 閉線形 理論에 立脚하여 다음의 基本 假定 및 制約條件에 의하여 行하였다.

1. 1. 基本 假定

- ① 直接流出은 이미 알고 있는 것으로 한다.
- ② 等時間 間隔內的 超過雨量은 均一한 分布를 가지며, 各 超過雨量은 核當時間內的 平均時雨量內에 包含되어 있어야 한다.
- ③ 流域變換系는 반드시 時因果關係(time causal)가 成立되어야 한다.
- ④ 流域變換系의 線形性은 時不變性(time invariant)이어야 한다.
- ⑤ 媒介變數는 集中定數(lumped parameter)系이어야 한다.
- ⑥ 線形性 解析은 重疊의 原理가 이루어지는 閉線形 關係를 가지고 있어야 한다.

1. 2. 制約 條件

- ① 有效單位雨量 1 mm에 대한 總有效流出量과 單位函 縱距 面積의 比는 1이 되어야 한다.
- ② 超過雨量의 部分的 ϕ index法의 概念을 適用할 時 超過雨量의 合은 修正前 ϕ index로부터 구한 超過雨量의 合과 같아야 한다.
- ③ 本 研究은 離散形의 閉線形系에 局限한다.

2. 線形系 理論에 의한 單位函 誘導

系(system)란 入力(input)이 作用할 때 出力(output)이 發生하는 物理的 要素들의 總括을 뜻하며, 入力과 出力 兩者는 모두 時間의 函數이다.

降雨과 流出에 의한 流域系는 線形系와 非線形系로 大別될 수 있으나, 本 研究에서는 線形系에 局한 하며, 入力は 降雨이고 出力이 流出인 線形系로 看做하여 圖示하면 그림 2. 1과 같다.

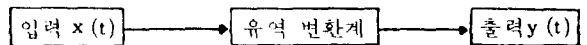


그림 2. 1 유역 응답계

系分析은 入力과 出力의 同時 觀測 結果值가 未知의 系応答函數를 誘導하는데 使用되는 技術的 解法이다.

만약 入力과 出力이 단 하나의 變數의 函數라고 하면 그 系는 集中定數性系(lumped-parameter system)이라 하고, 그 系가 時間에 따라 變化하지 않는다면 그 系는 時不變(time invariant)性을 가진다.

出力은 入力의 過去值에만 依存하기 때문에 降雨과 流出系는 時因果關係로 取扱될 수 있다.

系の 記憶 길이는 入力의 影響이 미치는 過去와 現在와의 어떤 時間 變位이며, 單位圖에서는 通常 基底時間이라고 稱하고 있다. 또한 任意時間에서 주어진 入力 때문에 系의 答이 獨斷的으로 決定되어진다면, 그 系는 決(確)定論的的(deterministic)이라 일컫는다.

만약 入力 $X_1(t)$ 와 $X_2(t)$ 가 주어졌을 때, 出力 Y_1 및 Y_2 가

$$Y_1 = F_1[A_1 X_1(t)] \quad (1)$$

$$Y_2 = F_2[B_1 X_2(t)] \quad (2)$$

로 나타내어지고,

$$Y_1 + Y_2 = F_1[A_1 X_1(t)] + F_2[B_1 X_2(t)] = A_1 F_1[X_1(t)] + B_1 F_2[X_2(t)] \quad (3)$$

일 때, 이와 같은 確定論的的 系 F를 線形變換(linear transformation)이라고 한다.

式(3)에서 衝擊(入力)이 時間에 대하여 函數關係를 가질 때 이를 連續形이라고 하며 核函數(kernel function)가 이에 屬한다. 反面에 그렇지 못할 때를 離散形이라 한다.

分 또는 時雨量 強度는 時間에 대하여 不連續形이므로 이들로 부터는 回旋積分形의 核函數를 誘導하기란 그 解析이 複雜하므로 本 研究에서는 便宜上 離散形 線形系에 의하여 解析코자 한다.

離散形 單位圖는 前述한 바와 같이 時間에 대하여 連續性을 가지지는 않으나 單位圖의 세가지 基本假定, 즉 重疊, 比例, 一定基底時間에 의하여 誘導될 수 있다.

어떤 流域에 任意의 期間동안에 持續時間이 相異한 (같은 경우도 해당함) 그림 2. 2(a)와 같은 경우가 發生되없다면, 그림 2.2(b)의 超過雨量과 그림 2.2(c)의 直接流出로 부터 各各 任意時間單位圖 縱距를 式(4)와 (5)로 부터 구할 수 있다.

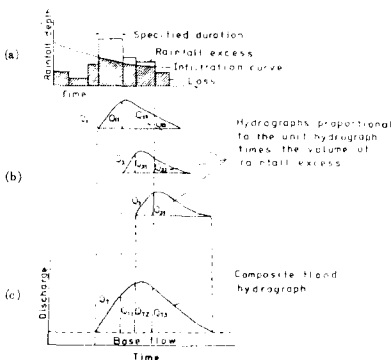


그림 2. 2 세개의 임의의 지속기간을 가진 초과우량

그림 2. 2에서 세개의 超過雨量의 持續期間이 같다고 하면, Q_1, Q_2, Q_3 로 부터 求한 3개의 單位圖는 一致하며, 이것으로 부터 任意時間單位圖를 誘導할 수 있다.

이를 一般式으로 表現하면 다음과 같은 線形關係를 얻는다.

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^i U_j RE_{i-j+1} \Delta j \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

여기서 Q_{Ti} : 有効流出 水文曲線의 i 번째 縱距

U_j : 單位圖 j 번째 縱距

RE_i : 任意 持續期間을 가진 i 번째 超過雨量

이 경우 單位圖의 繼續時間이 未知數이므로 別途로 이것을 定할 必要가 있다. 式(4)에서 未知數를 k 개, $\Delta j = 1, j = 1, 2, \dots, k$ 라 한다.

여기서 入力과 出力은 항상 양이기 때문에 음의 값을 가지지 않으며, 시간 $t=0$ 이후의 入力(降雨)는 系의 出力(流出)에 어떤 影響을 주지 못하므로, 따라서 $i-j+1 < 0$ 일 때, 0의 값을 갖는다.

上記 方法으로 부터 單位圖는 Matrix形으로 表現될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{T1} \\ Q_{T2} \\ \vdots \\ Q_{Ti} \\ \vdots \\ Q_{Tk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RE_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ RE_2 & RE_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RE_i & RE_{i-1} & 0 & RE_{i-j+1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RE_k & RE_{k-1} & 0 & RE_{k-j+1} & \dots & RE_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_j \\ \vdots \\ U_k \end{bmatrix} \quad (5-a)$$

$$[Q_T] = [RE][u] \quad (5-6)$$

流域變換系가 線形系일 경우 그림 2.1의 入力 $x(t)$, 出力 $y(t)$ 사이에 式(6)과 같은 回旋積分形(convolution integral)이 成立된다.

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\delta) h(t - \delta) d\delta \quad (6)$$

式(6)에서 現在時刻 t 를 원점으로 移動된 時間變位를 τ 라고 하면,

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - \tau) h(\tau) d\tau \quad (7)$$

로 된다.

積分方程式의 核인 $h(t)$ 는 linear response function, impulse response function, weighting function 및 instantaneous unit hydrograph라고 일컫고 있다. 式(7)를 離散的으로 表示하면 式(4)와 같다.

2. 1. 基底流出과 直接流出의 分離

1時間單位圖를 誘導하기 위하여는 우선 流量水文曲線에서 基底流出 直接流出을 分離해야 하는데 實際로

이의分離는 單位圖의 誘導에 크게 영향을 미친다. 이에 本 研究에서는 비교적 잘 맞다고 알려진 Schulz⁽²⁶⁾의 變換기울기法(Inflexion slope method)에 水文曲線의 變曲點들을 追加로 고려하며 일종의 修正變換기울기法을 개발하여 基底流出과 直接流出을 分離한다.

여기서 이 方法을 多變屈曲法(multideflexion method)이라 稱하기로 한다.

(1) Schulz의 變換기울기法

Schulz의 變換기울기法을 紹介하면 그림 2.3과 같다

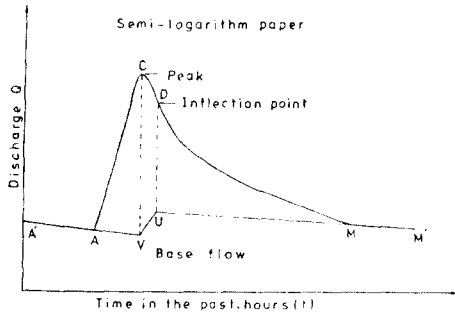


그림 2.3 변환 기울기법에 의한 직접유출과 기저유출 분리

그림 2.3에서 上昇起点 이전의 減少流量 A'A를 C點下까지 直線으로 延長하여 V를 求하고, 또한 減水曲線의 直線部分 MM'를 延長하여 變曲點 D下의 切線을 決定하면 基底流出과 直接流出을 AVUM의 切線에 의하여 分離한다. 그러나 一般的으로 그림 2.3에서 A에서 M點 사이에는 流域特性때문에 여러개의 變曲點을 가지게 되며, 특히 M點 부근에서는 多數의 變曲點이 發生하는데, Schulz의 理論에서의 이에 대한 考慮가 부족한 것으로 판단된다.

2) 多變屈曲法

本 方法은 試算法(trial method)에 의하여, 첫째로 直接流出의 終點의 決定, 둘째로 水文曲線의 尖顛流量前後에 發生되는 變曲點을 고려하므로써, 多數의 基底流出이 變曲點을 推定하여 最適의 基底流出을 求하는 것이다.

그 過程을 열거하면 다음과 같다.

1) 直接流出의 終點決定 및 1次 基底流出 分離

長時間 經過後 減水曲線을 半自然對數方眼紙上에 圖示하면 그림 2.4(a)와 같이 E點으로부터 K點 사이에서는 多數의 變曲點이 發生하게 되어 直接流出의 終點을 決定하기가 어려우므로 다음과 같이 決定한다.

直接流出의 終點附近의 EF, FG, GH, HI, IJ, JK,

KM'의 直線群들을 各各 延長하여 變曲點 D의 垂直線과 만나는 點을 $U_e, U_i, U_g, U_h, U_j, U_k$ 라 한다. 이 여러개의 連結線 中에서 다음의 檢定을 통하여 하나를 基底流出의 分離線으로 選擇한다.

FG, HI, JK의 延長線은 觀測流量보다 위에 있는 경우이고 KM'의 延長線에 의한 基底流出은 너무 적게 되어 總直接流出量이 總雨量보다 커지는 경우가 發生되므로 對象이 되지않고 實際로는 EF, GH, IJ만이 對象이 된다.

例로서 I點이 終點이라 假定하고 AXU_i의 연결線에 의하여 일단 直接流出을 分離한 後 直接流出量 ACI-U_iX를 利用하여 이에 해당하는 單位圖를 誘導하고同一 降雨 條件下에서 이 單位圖로 부터 計算한 流量과 實際 觀測流量과의 差異를 求한다.

이와 같은 計算을 E點, G點에 대하여도 同一하게 計算하여 各各에 대한 計算流量과 觀測流量과의 差異를 求한다. 이들 EF, GH, IJ의 延長線에 대하여 求한 流量差 中에서 그 차이를 가장 적게 나타내는 連結線이 구하고자 하는 基底流出 分離線이 된다.

이 最適 連結線과 D의 垂直線의 만나는 點을 U라

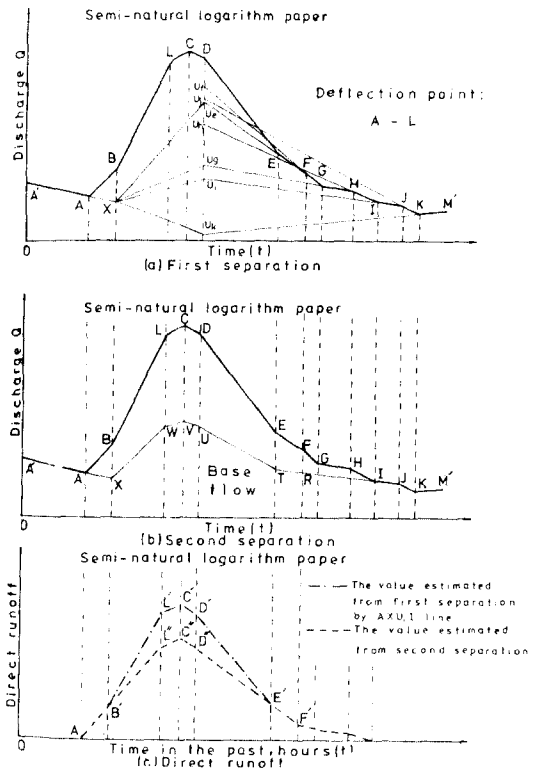


그림 2.4 다변 굴곡법에 의한 직접유출과 기저유출 분리

하고, 이 U점에서 부터 X점까지 直線으로 연결하여 基底流出을 分離하고 이것을 多變屈曲法의 1차 基底流出을 分離라 한다.

2) 2次 基底流出 分離

1次 基底流出 分離에 의하여 誘導된 單位圖로 부터 算定된 流量值와 觀測值의 誤差가 비교적 크게 나타날 때는 다음과 같이 基底流出의 變曲點을 보다 細分化한 多變屈曲法의 2次 基底流出 分離에 의한다.

1) 그림 2.4 (a)에서 AA'를 延長하여 上界部의 變曲點(B)下 X를 求한다.

2) 1次 基底流出 分離에 의하여 推定된 直接流出을 半自然對數方眼紙 上에 그리면 F'E'線과 離脫함을 알 수 있다. 縱距 C'D'E'F'는 (b)圖의 CV, DU, EN, FR에 해당된다.

(3) (c)圖에서 減水曲線部의 F'E'D'는 直線이 아니고 오히려 E'F'의 연장선인 F'E'D''의 위로 올라가 있다. 바로 이 D'D''가 基底流出의 急增에 의한 것으로 看做하여 E'F'를 그대로 연장한 F'E'D''를 直接流出線으로 定하여 D''를 決定한다. 다음에 (b)圖의 觀測流量D點의 縱距에서 (c)圖의 D''의 縱距를 빼준 값을 (b)圖에 plot하면 U를 얻는다.

(4) (b)圖에서 尖頭流出 附近인 CD區間은 變曲點 D를 중심으로 曲線의 性質이 달라지므로 몇개 流域의 實際計算에서 얻어진 經驗을 통하여 (a)圖의 點C와 D를 直線으로 연결한 切線 CD의 기울기와 同一한 기울기로 (c)圖에서 C'D''를 그리면 된다.

이렇게 하여 얻어진 基底流出 分離線이 (b)圖의 VU의 連結線이다.

(5) 위와 同一한 方法으로 上界部 曲線에도 適用하면 (b)圖와 같이 W點을 求할 수 있다.

2.2 超過雨量 算定

超過雨量 算定方法에는 지금까지 一定比 損失雨量法과 總損失量間의 關係曲線을 使用하는 方法, 浸透能 曲線을 使用하는 方法(Φ index, W index), 損失率을 降雨의 蓄數로 나타내어 구하는 方法 등이 있다.

이들 方法中 概略의 으로 便利하고 實際로 많이 使用되는 方法은 Φ index 法이지만, 이 方法은 時間別 浸透能을 考慮하지 않는 弱點이 있으므로 有效流出이 發生되는 期間동안 初期에는 비교적 實際 값보다 크게 發生되고 後期에는 작아지는 傾向이 있다.

여기서 Φ index는 總超過雨量과 直接流出 容積과 같은 값이 되는 平均降雨率을 말한다. (그림 2.5 참조)

總浸透量을 basin recharge 이라고 하면 Φ index는 다음과 같이 表現되어질 수 있다.

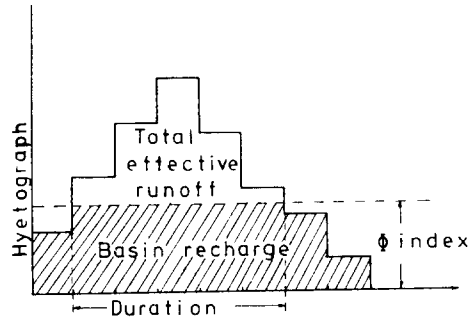


그림 2.5 Φ index의 개념

$$\text{index} = \frac{\text{basin recharge (Br)}}{\text{降雨持續期間 (td)}} \quad (8)$$

여기서 遮斷貯溜(interception), 凹面貯溜(depression storage) 및 浸透量은 basin recharge에 包含된다. 그러나 basin recharge에 浸透量만 고려하고 나머지 두개를 빼는 경우를 W index라고 일컫고 있다.

W index는 Φ index法을 약간 改善한 것이라고 하나 計算하기가 비교적 까다롭다.

Φ index는 浸透能을 너무 簡單하게 처리하기 때문에 때때로 批評을 받고 있지만, Φ index 概念은 대개 큰 流域에서 豪雨流出을 研究하는데 意味 있는 것으로 알려져 있으며, 各各의 豪雨事象으로 부터 計算될 수 있다.

本 研究에서는 前述한 바와 같은 Φ index의 弱點을 補充하고 또한 式(4)의 線形論을 滿足하여야 한다는 大前提 下에서 Φ index의 基本概念을 單位圖 縱距가 區別로 設定되었을 段階에서 適用기로 한다. 여기서 基底流出을 既知數로 하였을 때 單位圖 縱距가 決定되면 式(4)가 이루어지기 위해서는 超過雨量도 同時 決定되어져야 한다.

그 過程은 2.3에서 詳述되어 있으므로 여기서는 省略하고 簡單하게 例를 들면 다음과 같다.

式(4)의 $i = 1, j = 1$ 의 경우에 대하여 $Q_{T1} = RE_1 \cdot u_1$ 로 부터 $RE_1 = Q_{T1} / u_1$ 이 된다. 여기서 Q_{T1} 는 既知數이므로 u_1 를 決定해 주면 RE_1 이 決定되어진다. 이 때 平均浸透能인 Φ index로 부터 求한 初期 超過雨量은 實際값보다 크게되는 傾向이 있으므로 上記 方法으로 부터 求한 各時間別 超過雨量에 等分配해 준다. 이때 물론 Φ index도 修正이 加해진다.

위의 等分配나 Φ index의 變化는 總超過雨量에 變化를 주지 않기 위해서이며 水文學的 意味는 다음과 같다.

豪雨初期에는 浸透率이 크게 되었다가長時間 經透能 이 弱하게 되어 거의 一定한 값에 이르게 된다. 즉 ϕ index 의 값이 거의 一定하게 값에 이르게 됨을 뜻한다. 前述한 等分配에 該當되는 ϕ index 의 修正值가 各時間마다 決定된 다음 그림 2.6 의 A 점以後는 最終 修正 ϕ index 가 適用된다.

따라서 降雨初期로 부터 이 A 点 以前에는 時間別 浸透能이 各各 다르게 나타난다. (그림 2.6 참조)

그림 2.6 의 曲線은 浸透能 曲線이며 一般的으로 미끈한 曲線으로 알려져 있다.

그림과 같은 浸透能 曲線이 바람직하다. 水文資料의 觀測誤差, 降雨分布의 不均一性, 直接流出의 推定에 의한 誤差 및 方法의 線形 假定으로 本研究 方法에서의 超過雨量 推定方法으로 부터 求하여진 損失雨量 柱狀圖의 各 時間別 尖頭部分을 連結하면 實際 그와 같은 미끈한 曲線이 獲得되기 힘들며 一般的인 浸透能 曲線과는 差異를 나타내는 凸凹形의 不連続形이 된다.

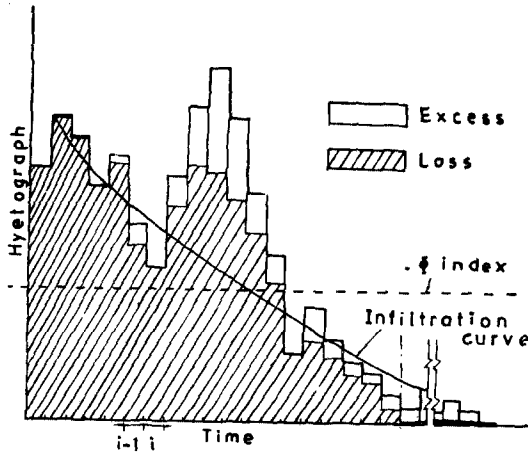


그림 2.6 수정손실우량

이 修正 ϕ index 方法이 바로 本研究者에 의하여 새로 提唱된 것이다.

① 먼저 ϕ index 法에 의하여 超過雨量을 算定한다.

② index 法에 의하여 算定된 超過雨量이 單位圖 縱距 修正時(2.3 참조)에 함께 修正되어야 하므로 修正되지 않은 雨量은 다음과 같이 된다.

그림 2.6 의 雨量柱狀圖로 부터 任意의 i 번째에서 i 번째의 超過雨量이 修正되었을 때 i 번째 以前의 超過雨量들은 修正處理된 값들이기 때문에 變化를 주어서는 안되며 i 번째 以後의 超過雨量만 修正해야 한다. 이 修正은 i 번째를 起點으로 하여 ϕ index 法의 basin

recharge 의 修正方法과 같게 한다.

$$D_v = \{ T_r - (P_{sum} + R_{sum} + P_{rvi}) \} \quad (9)$$

여기서 T_r : 總超過雨量

P_{sum} : i 번째 以前의 修正確定된 超過雨量의 合

R_{sum} : i 번째 以後의 超過雨量의 合

P_{rvi} : i 번째 修正超過雨量

i 번째에서 修正된 ϕ index 는

$$\phi \text{ index} = \text{修正前 } \phi \text{ index} - (D_v - N_o) / N_o$$

여기서 N_o : 總降雨時間에서 修正된 超過雨量 時間을 뺀 時間

上記 方法에 대한 流通圖을 作成하면 그림 2.7과 같다.

單位圖 縱距 設定方法은 2.3에서 詳述될 것이므로 여기서는 省略하기로 한다.

以上과 같이 하여 各 順番에 대한 修正 ϕ index가 구하여 지면 그림 2.6과 같은 修正 損失量이 推定될 수 있다.

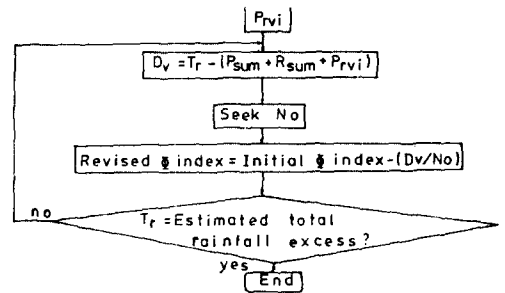


그림 2.7 초과우량 산정을 위한 유통도

2. 3. 1 時間 單位圖 誘導

超過雨量과 直接流出로 부터 式(5)에 依하여 單位圖 縱距가 誘導될 수 있으나, 實際로는 各種 誤差로 因하여 一般 單位圖와 같은 水文曲線을 獲得키 어려우므로 式(5), 2.1 및 2.2에 依하여 다음의 過程으로 부터 誘導한다.

① 첫번째 縱距 u_1 는 Q_{T1} / RE_1 으로 부터 구한다. 여기서 直接流出 Q_{T1} 는 既知數이나 u_1 과 RE_1 는 未知數이므로 다음과 같은 假定下에서 u_1 를 設定한다.

2.2에서 前述한 ϕ index 의 初期 超過雨量은 實際값보다 큰 誤差를 나타낼 경우가 많다. 그러나 이 RE_1 는 $0.0(\text{mm}) < RE_1 < P_1$ 범위에 있어야 하므로, RE_1 를 이 區間 내에서 0.1씩 變化를 주어 各各의 u_1 를 구한다. 여기서 P_1 는 直接流出이 發生되는 始作時間의

平均時間雨量이다.

② ①에서 부터 구한 각개의 u_1 으로 부터, 2.2의 部分別 修正超過雨量과 直接流出에 依하여 u_2 를 구한다. 以不 u_3, u_4, \dots 는 上記 方法과 같이 段階的으로 求解한다.

i) 그림 2.8에서 i_t 번째 縱距 C' 點이 先行 두 縱距 AB 를 延長한 縱距 C 點으로 부터 $\frac{CC'}{C}$ 의 絶对值의 比가 0.1以內에 들어올 때는 C' 點을 그대로 扞하여 BC' 를 連結하지만, 그 比가 0.1을 超過하여 심한 離脫을 나타낼 때는 AB 를 直線的으로 延長하여 만난 C 를 扞하게 된다. 또한 $CD'E'$ 와 같이 凸凹이 發生될 때도 上記와 같은 方法에 依하여 單位圖의 縱距를 求한다. 여기서 絶对值 0.1를 扞한것은 單位圖의 모양이 一般的으로 비관하기 때문에 이와 같은 비관한 曲線을 獲得키 위하여 試圖의 一種의 經驗的인 것이다.

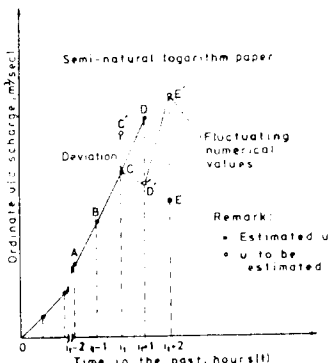


그림 2.8 부분 수정 단위도 증거

ii) 尖頭縱距 制限: 그림 2.8에서 D' 는 線形論에 의하여 計算이 進行될 때 任意 $i_t + 1$ 번째의 값이 i_t 번째 보다 적은 값이며, 以後 $i_t + 2$ 가 i_t 및 $i_t + 1$ 번째 보다 縱距의 값이 적고 i)항에서 說明한 趨勢로 나타날다면 C 의 값이 尖頭縱距가 된다. 물론 이때 이 C 의 값은 後述하는 尖頭縱距의 制限範圍內에 있어야 한다. 그러나 初期 直接流出 및 超過雨量의 假定值가 實際값과 많은 誤差를 包含할 때 및 中間 過程에서 水文學的 各種 誤差로 因하여 長時間 水文曲線이 上昇하는 경우가 發生될 때는 尖頭縱距를 制限한다. 制限範圍는 水文曲線 원점부터 시작하여 尖頭縱距들까지의 合(그림 2.9의 빗금친 부분)이 總有効流出量과의 比가 어느 基準範圍內에 들어 올 때이다. 이를 위하여 既發表된 單位圖⁽²⁷⁾로 부터 Scurve에 의하여 1時間單位

圖를 誘導하여 그 比를 구한 結果는 表-1과 같다.

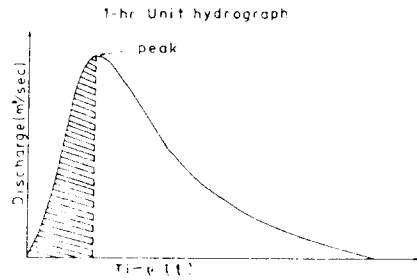


그림 2.9 1시간 단위도의 첨두유량까지 증거합

表-1 1시간 단위도 증거의 면적합과

첨두 증거까지 면적합의 비

측수점	강명	A (km ²)	L (km)	Lc (km)	Rc
성선	한강	1,709.7	108.6	53.6	0.329
영월	"	2,421.0	186.5	80.0	0.309
성강	"	725.5	75.1	43.5	0.293
후포	"	1,611.0	137.5	81.0	0.325
충주	"	6,749.8	290.9	133.0	0.323
횡성	"	442.5	49.1	25.8	0.295
홍천	"	877.0	78.5	26.5	0.222
공주	금강	7,125.8	306.0	104.5	0.326
석화	"	1,834.7	85.0	31.0	0.312
충포	"	3,940.0	239.0	95.5	0.321
유천	"	2,942.6	169.0	72.3	0.356

여기서 A : 流域面積

L : 流量 離測點부터의 河川延長

Lc : 流量 離測點부터 河川을 따라 流域重心까지 거리

Rc : 總縱距의 合과 尖頭縱距까지 面積合의 比

表-1에서 나타난 바와 같이, 그 比는 流域의 特性 因子들과 無關한 것으로 나타났다. 따라서 直接 이들 比를 決定한다는 것은 不可能하므로 이들 값중 最小值 (0.222 = 1/4.5)와 最大值 (0.357 = 1/2.8)를 扞하여 그 限界範圍를 定하였으며, 尖頭流量의 縱距가 이 範圍內에 있도록 한다.

iii) 減水曲線: ii)項에서 尖頭縱距의 制限性에 의하여 設定되거나, 또는 減水曲線에서 連續的인 凸凹이 發生될 때는 先行 두 縱距에 의하여 繼續 直線化 시키는 것이 無意味하므로 이 때는 該當 縱距에서 부터 基底時間까지 半自然法眼紙 上에서 直線化 하였다. 여기서 直線化 試圖는 이미 Barnes⁽²⁸⁾가 水文曲線의 水減

曲線은 半自然对数方眼紙 上에서 直線的으로 된다고 밝힌 바 있다.

iv) 縱距의 連續의 平均: i), ii), iii) 項에 의하여 獲得된 單位函은 先行 두 縱距들에 의하여 直線化 試圖로 부터 多少 屈折現象이 發生되어지는 경우가 있으므로, 이들을 보다 미끈한 曲線으로 誘導하기 위하여 隣接하고 있는 縱距들을 連續的으로 平均해 간다. 여기서 平均化 方法은 미끈한 水文曲線을 얻기 위하여 몇몇 學者들(20)(29)에 의하여 試圖된 바 있다.

以上の 알고리즘에 대한 컴퓨터 流通圖가 그림 2.10 이다.

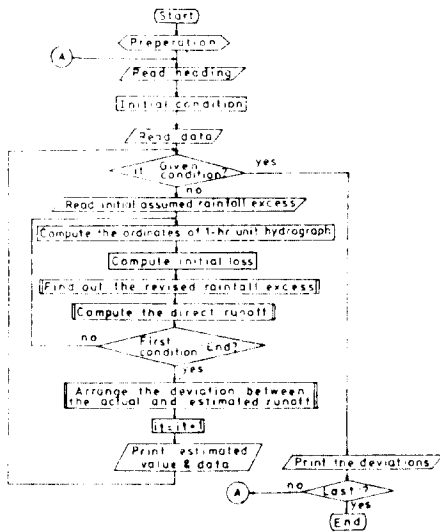


그림 2.10 1시간 단위도 증거와 초과우량 산정을 위한 유통도

以上과 같이 하여 ①項에서 初期 超過雨量의 各假定 値에 대하여 그 算定流量이 觀測流量과 誤差를 最小로 하는 것을 該當 豪雨集團에 대한 1時間單位函로 採択한다. 이때 計算上의 有效숫자 및 水文學的 誤差를 考慮하여 單位函 縱距의 合과 有效雨量 1mm에 該當하는 流出量과의 比가 完全히 1이 되는 것이 不可能하므로 0.99 ~ 1.01의 範圍內에 있으면 採択한다.

3. 代表單位 流量圖의 誘導

降雨과 流出의 線形論에서 核函數는 一般的으로 式 (14)와 같이 나타내어 진다고 알려져 있다. (22)(30)(31)

$$h(t) = a \cdot t \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (11)$$

여기서 $h(t)$: 核函數

t : 時間

a, α : 常數

式(11)는 連續形 回旋積分에 의한 核函數이나, 本 研究에서는 離散形에 의하여 誘導되어진 單位函들로부터

式(11)를 引用하여 다음과 같이 代表單位函을 設定한다.

여기서 誘導되어지는 代表單位函은 convolution integral에 의하여 求하여지는 kernel function의 意味를 가지지 않는다.

지금까지는 한 流域을 代表하는 單位函을 作成하기 위해서는 비교적 一定한 強度를 가진 持續期間이 서로 다른 數個의 獨立된 豪雨事象으로 부터 單位函을 誘導한 後 各 單位函의 尖頭流量의 平均値와 尖頭流量의 發生時間의 平均値를 求하여 代表單位函의 尖頭流量點의 座標를 決定한 後 다른 單位函들의 型에 비슷하게 스케치 하여 얻게되는 經驗的인 方法을 行하여 왔다. 이는 作成者의 主觀性을 內包하고 있으므로 誤差를 범할 우려가 많다.

따라서 本 研究에서는 簡單한 數值解法으로 부터 單位函 水文曲線인 式(11)를 引用하여 代表單位函을 推定하였다.

먼저 尖頭流量과 時間은 各 單位函들의 尖頭流量 및 時間을 算術平均하여 구한다. 다음 尖頭流量 前(上昇曲線)과 後(減水曲線)의 式을 各各 求한 後 單位函數(unit function)에 의하여 兩者를 合成한다.

3. 1. 上昇曲線의 誘導

式(14)의 核函數는 未知數가 a, α 의 두개이므로 이를 求하려면 最小 두점이 把握되어야 한다. 한점은 尖頭縱距를 利用하고, 또 한점은 共通으로 通過한다고 假定되는 點을 挾하여 一次 上昇部 曲線을 誘導한다. 그러나 後者は 假定値이므로 이 假定値에 微小値를 增減하여 그림 2.11에서의 橫距에 대한 縱距偏差 D_{ni} 의 自乘의 合이 最小가 되는 값을 取한다. 이때 물론 尖頭流量 및 時間은 變化를 주지 말아야 하면, 이 條件

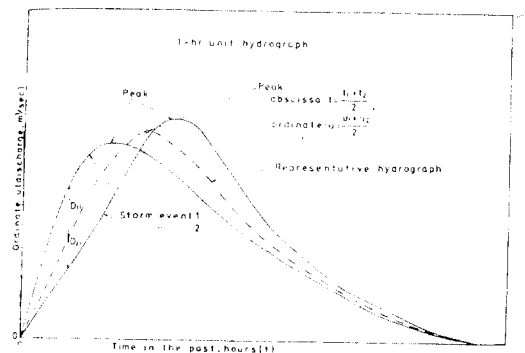


그림 2.11 1시간 대표 단위도

을 滿足하기 위해서는 假定值 α 가 주어지면 同時 α 도 決定된다.

3. 2. 減水曲線의 誘導

減水曲線도 上昇曲線과 誘導過程이 비슷하나, 단 이 때는 偏差自乘의 最小보다는 縱距面積의 合이 有效單位用 量 1mm의 有效流出量과의 比가 1이 되는데 重點을 두어야 한다. 여기서 代表基底時間은 各 豪雨集團別 基底時間을 平均한 값이다.

上記 代表單位圖들의 上昇曲線과 減水曲線이 尖頭流量에서 兩者는 完全一致가 되지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 現象은 各式들이 가지는 係數들의 有效숫자에 基因되어지는 것으로서, Papazafirious⁽²²⁾는 超過雨量을 單位函數形으로 나타낼 때, 不連續形인 이와 같은 曲線을 係數의 소숫점 이하 5째 자리에서 거의 一致시킨 것으로 되어 있으나 完全一致는 不可能하다.

따라서 本 研究에서는 兩式으로 부터 구한 尖頭縱距의 크기에 따라서 不等式으로 調節하였다.

4. 本 研究에 의한 1時間單位 流量圖 適用例

本 研究에서 開發되어진 1時間單位流量圖 誘導設定 方法의 妥當性 檢定을 위하여 流域을 選定하여 適用하고, 이미 他人에 의해 發表된 同一流域의 單位圖와 比較檢討한다.

4. 1. 適用 對象

單位圖를 誘導하기 위하여 選定될 수 있는 對象流域은 一般的으로 流域面積이 約 5,000 km²以內이어야 하고, 多地點의 雨量과 該當地點의 水位記錄이 自動記錄裝置에 의하여 同時測定되어 있고 또한 비교적 信賴度가 높은 資料가 있는 곳이어야 한다.

本 研究에서 對象流域으로 選定한 地域은 洛東江流域의 臨河 및 東村地點과 錦江流域의 龍潭地點이다.

4. 2. 基本 資料

本 研究에 使用된 水文資料는 研究調查報告書⁽²⁷⁾와 洛東江 및 錦江流域 洪水流出 分析調查 附錄圖書⁽³²⁾에서 直接拔萃하였으며, 이 외에도 水文調查年報⁽³³⁾, 韓國河川 調查書⁽³⁴⁾를 參考로 하였다.

4. 3. 平均時雨量

各 流域에 대한 平均 時雨量은 Thiessen網을 構成하여 各 網에 대한 面積을 求積器에 의하여 10번 旋行한 平均值이다. 年度別 觀測雨量을 保有하고 있는 地點이 相異하였으므로, 各 경우에 대하여 Thiessen網을 構成하여 面積比를 求하였으며 表- 2, 3, 4와 같다.

表- 2 臨河流域의 Thiessen網 加重比

기간	지점	영양	청송	죽장	임동	비 고
1969.9.14 ~ 9.16						참고문헌(32)에서 산정된 평균 시우량 인용
1971.6.30 ~ 7.2			0.578	0.061	0.361	
1971.8.5 ~ 8.7		0.429	0.404		0.167	
1972.8.19 ~ 8.21		0.481	0.458	0.061		

表- 3 東村流域의 Thiessen網 加重比

기간	지점	죽장	신령	영천	자인	비 고
1969.9.14 ~ 9.18		0.198	0.205	0.289	0.308	
1970.7.4 ~ 7.8			0.571		0.429	
1972.7.2 ~ 7.6		0.198	0.205	0.289	0.308	
1972.8.19 ~ 8.21		"	"	"	"	

表- 4 龍潭流域의 Thiessen網 加重比

기간	지점	진안	금산	비 고
1970.7.4 ~ 7.6				참고문헌(27)에서 산정된 평균 시우량 인용
1971.7.25 ~ 7.27		0.9	0.1	
1972.7.9 ~ 7.12		"	"	
1972.8.19 ~ 8.21		"	"	

4. 4. 1時間代表單位圖誘導

各 豪雨集團別 1時間單位圖 縱距를 設定하고 이들로 부터 代表單位流量圖를 誘導한다.

그림 4.1은 流域別 各 豪雨集團들에 대한 初期 假定超過雨量에 대한 最善의 結果值를 나타낸 것 가운데 그 例로써 臨河地點의 1969年 豪雨事象에 대하여 提示한 것이다. 이들로 부터 誘導된 各 豪雨集團別 1時間單位圖가 그림 4.2~4.4이며, 또한 推定된 代表單位圖의 曲線式이 式(12)~(17)으로서 그림 4.2~4.4의 實線이다.

① 臨河 { 上昇曲線 : $h(t) = U_a 3.90815 t \cdot e^{(-t/95.49962)}$ (12)

減水曲線 : $h(t) = U_a 15.81207 t \cdot e^{(-t/5.4)}$ (13)

여기서 U_a { 1 : $0 \leq t \leq 8$
0 : $t < 0, t > 8,$

U_d { 1 : $8 < t \leq 40$
0 : $t < 8, t > 40$

인 單位函數이다.

② 東村 { 上昇曲線 : $h(t) = U_a 4.54540 t \cdot e^{(-t/26.20000)}$ (14)

減水曲線 : $h(t) = U_d 29.14260 t \cdot e^{(-t/4.4)}$ (15)

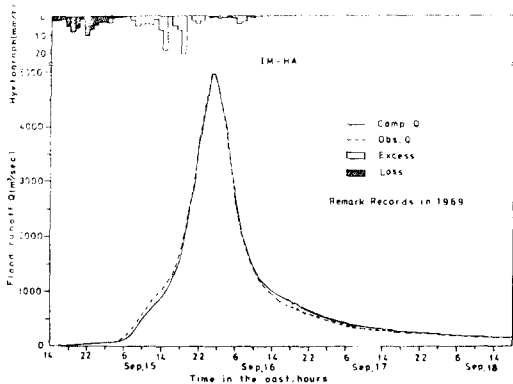


그림 4.1 임하 지점의 관측유량과 산정유량

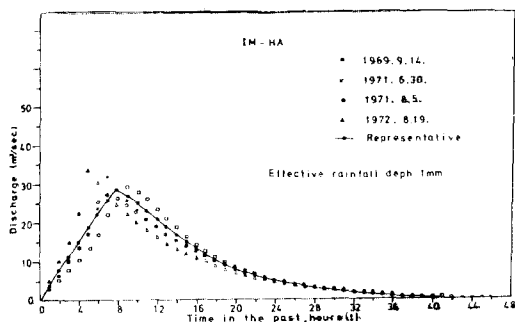


그림 4.2 임하 1시간 대표 단위도

여기서 U_a { $1 : 0 \leq t \leq 7$
 $0 : t < 0, t > 7,$

U_d { $1 : 7 < t \leq 50$
 $0 : t < 7, t > 50$

③ 龍潭 { 上昇曲線 : $h(t) = U_a 6.93081 t \cdot e^{-(t-2.24606006)}$ (16)
 減水曲線 : $h(t) = U_d 21.01647 t \cdot e^{-(t/3.6)}$ (17)

여기서 U_a { $1 : 0 \leq t \leq 4$
 $0 : t < 0, t > 40,$

U_d { $1 : 4 < t \leq 38$
 $0 : t < 4, t > 38$

5. 比較檢討 및 分析

本 方法은 降雨-流出 關係를 線形으로 보아 單位圖를 解析의 解法에 의하여 誘導하기 때문에 超過雨量과 直接流出의 推定値가 실제값에 가깝지 않으면 流量의 觀測値와 計算値間의 誤差가 커질 憂慮가 있다. 따라서 本 方法의 適用을 위해서는 실제값에 近似한 超過雨量과 直接流出의 決定이 必須인 것이며, 이의 解

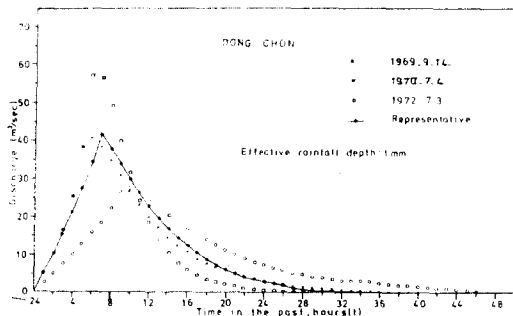


그림 4.3 동촌 1시간 대표 단위도

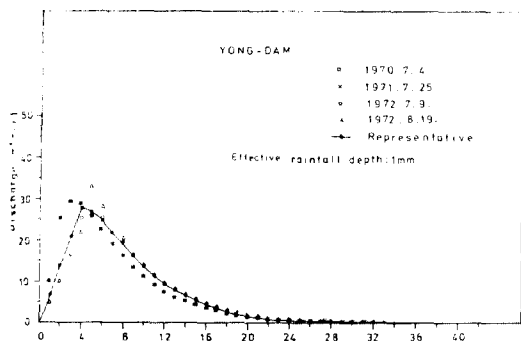


그림 4.4 용담 1시간 대표 단위도

決을 위하여 兩者의 推定方法을 試圖하고, 그들로부터 얻어진 單位圖를 同一流域에서 이미 誘導되어진 바가 있는 合成單位圖 및 지금까지 우리나라에서 비교적 使用頻度가 강한 Nakayasu方法과 比較한 結果(그림 5.1~5.3 참조) Nakayasu方法과는 縱距의 偏差가 크게 나타났으나, 우리나라 流域特性因子를 考慮한 合成

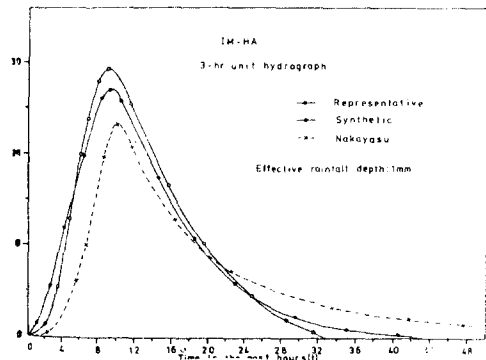


그림 5.1 임하 3시간 단위도

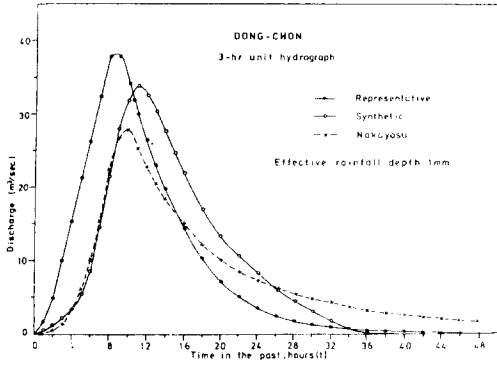


그림 5.2 동촌 3시간 단위도

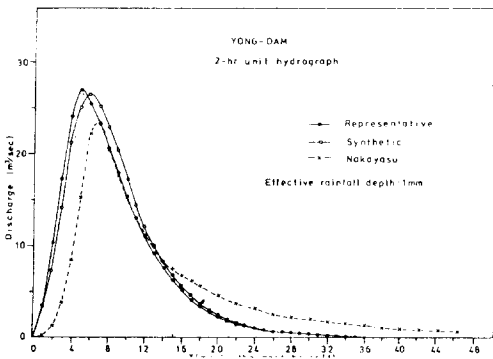


그림 5.3 용담 2시간 단위도

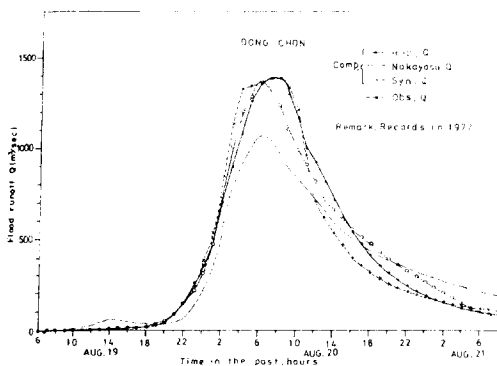


그림 5.4 동촌 지점의 관측유량과 방법별 산정유량 (1972. 8. 19~8. 21)

단위圖와는 近似한 樣相을 보여주었다. 또한 代表單位圖 誘導時 使用되지 않았던 東村의 1972. 8. 의 豪 雨事象에 대하여 適用한 結果(그림 5.4 참조) 流量의 計算値와 觀測値가 近似한 값을 나타내었으므로, 本 研究에서 開發된 알고리즘은 他 河川流域에서도 適用

할 수 있을 것으로 判斷된다.

6. 結 論

本 研究에서는 降雨와 流出關係를 解析하기 위하여 流域을 閉線形系로 假定하고, 各 豪雨集團別 離散形 1 時間單位圖 縱距와 이들로 부터 代表單位圖를 誘導하는 알고리즘을 開發하였다. 이의 妥當性 檢定을 위하여 洛東江 流域의 臨河 및 東村과 錦江流域의 龍潭地 點을 對象으로 本 方法을 適用하여 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 河川 流域과 같은 物理的 流動系를 閉線形系로 보고 降雨와 流出間의 關係를 解析의 으로 처리할 경우, 超過雨量 및 直接流出의 推定値가 실제값과 비교적 近似한 값을 지니지 못할 때는 線形論에 의한 解析的 解法은 거의 不可能하다. 따라서 本 研究方法과 같이 試行錯誤法(trial and error method)에 의하여 처리해 주므로써 이와 같은 점이 解結될 수 있다.

(2) 基底流出 分離는 本 研究에서 經驗的으로 開發한 多變屈曲法을 適用함으로써 從來의 方法들에 比하여 流量의 計算値와 觀測値의 誤差를 크게 줄일 수 있다.

(3) 超過雨量 算定은 本 研究에서 開發된 修正 ϕ index法을 適用함으로써 浸透能을 一定하다고 보는 ϕ index法의 弱點을 補完할 수 있다.

(4) 各 豪雨集團別 1時間單位圖를 誘導할 경우, 各 流量値의 縱距가 凸凹을 이루게 될 때 미끈한 單位圖를 만들기 위하여 本 研究에서 開發한 凸凹處理 方法은 $\pm 10\%$ 範圍(先行 2縱距로 부터 半自然對數方眼紙 上에서 直線化한 縱距와 離脫量과의 比)를 基準으로 하여 單位圖의 縱距 凸凹問題를 解決할 수 있다.

(5) 代表單位圖 誘導時 지금까지 스켓치하던 經驗的 이고 圖式的인 方法을 本 研究方法과 같이 解析的 解法으로 Computer package 할 수 있다.

Reference

1. Gregory, C. E., "Rainfall and Runoff in Storm-Water", Trans. of ASCE, pp. 458-510, 1907.
2. Justin, J. D., "Derivation of Run-off from Rain-fall Data", Trans. of ASCE, pp. 346-384, 1914.
3. Grunsky, C. E. "Rainfall and Run-off Studies", Trans. of ASCE, pp. 66-136, 1922.
4. Gregory, R. L. and Arnold, C.E., "Run=off-Rationl Run=off Formulas", Trans. of ASCE, pp. 1038-1177, 1932.
5. Meyer, O. H., "Analysis of Run-off Characteristic." Trans. of ASCE, pp. 83-141, 1940.

6. Synder, W., "Simplified Versus Optimum Unit Hydrographs-One Comparison", W.R.R., Vol. 3, No. 4, pp. 947-948, 1967.
7. Brakensiek, D. L. and Onstad, C. A., "The Synthesis of Distributed Inputs for Hydrograph Prediction", W.R.R., Vol. 4, NO. 1, pp. 79-85, 1968.
8. Frind, E. O., "Rainfall-Runoff Relationships Expressed by Distribution Parameters", Jour. of the Irrigation and Drainage Div., pp. 299-308, 1970.
9. Wilson, T.T. Jr. and Kirder E., "Use of Runoff Forecasting in Reservoir Operations", Proc. ASCE, Jour. of the Irrigation and Drainage Div., pp. 299-308, 1970.
10. Viessman, W. Jr., "Runoff Estimation for Very Small Drainage Areas" W.R.R., Vol. 4, No. 1, pp. 87-94, 1968.
11. Rodriguez-Iturbe, I. and Nordin, C.F., "Some Applications of Cross-Spectral Analysis in Hydrology: Rainfall and Runoff", W.R.R. Vol. 5, No. 3, pp. 608-621, 1969.
12. Yen, B.C. and Chow, V. T., "A Laboratory Study of Surface Runoff Due to Moving Rain-Storms", W.R.R. Vol. 5, No. 5, pp. 989-1006, 1969.
13. Betson, R. P., Tucker, R. L., and Haller, F. M., "Using Analytical Methods to Develop a Surface-Runoff Model", W.R.R. Vol. 5, No. 1, pp. 103-111, 1969.
14. Eagleson, P. S., "Deterministic Linear Hydrologic System", The Progress of Hydrology, Proc. of the First International Seminar for Hydrology Professors, pp. 400-419, 1969.
15. Rao, A. R. and Delleur, J. W., "Conceptual Hydrologic Models for Urbanizing Basins", Jour. of the Hydraulics Div., Proc. of the ASCE, pp. 1205-1220, 1972.
16. Snyder, W. M. and Asmussen, L. E., "Subsurface Hydrograph Analysis by Convolution", Jour. of the Irrigation and Drainage Div., Proc. of the ASCE, pp. 405-418, 1972.
17. Williams, J. R., "Concept of A Technique for an Analysis of Watershed Runoff Events", Decisions with Inadequate Hydrologic Data, Proc. of the Second International Hydrology Symposium, 1972, Fort Collins, Colorado, pp. 177-120, U.S.A.
18. Liu, C. K. and Brutsaert, W., "Optimal Identification of a Watershed Rainfall-Runoff System", The Hydrological Characteristics of River Basins Symposium, IAHS-AISH Pub., No. 117, pp. 3409.
19. O'connor, K. M., "A Discrete Linear Cascade Model for Hydrology", Jour. of Hydrology, 29, pp. 203-242, 1976.
20. Blank, D., Delleur, J.W. and Giorgini A., "Oscillatory Kernel Functions in Linear Hydrologic Models", W.R.R., Vol. 7, No. 5, pp. 1102-1117, 1971.
21. 藤田睦博, "線形系 ① 解析", 1975 年度(第 11 回) 水工学 I : 関すち夏期 研修会講義集 A ユース pp. A-7-1 ~ A-7-23, 9175.
22. Papazafiriou, Z. G., "Polynomial Approximation of the Kernels of Closed Linear Hydrologic Systems", Jour. of Hydrology, 27, pp. 319-329, 1975.
23. 李淳赫, "韓國主要水系的 小流域에 對한 瞬間單位圖 誘導에 關한 研究", 서울大學校 大學院 農學博士 學位論文, 1976
24. 尹龍男, 鮮于仲皓, "流域特性과 流出特性間의 相關關係 解析에 依한 單位流量圖의 合成", 韓國水文學會誌 물의 과학, 第 8 卷 第 1 號, pp. 61 ~ 79, 1975
25. 尹泰勳, "解析的 解法에 依한 흐름의 豫測", 韓國水文學會誌 물의 과학, 第 8 卷 第 2 號, pp. 93 ~ 99, 1975
26. Schulz, E. F., Problems in Applied Hydrology, Water Resources Publication Fort Collins, Colorado, U.S.A., pp. 314-315, 1972.
27. 鮮于仲皓, 朴成宇, 尹龍男, "洪水量 推定을 위한 合成單位流量圖 誘導의 研究調查", 研究調查報告書, 建設部, 1974
28. Barnes, B. S., "Discussion of Analysis of Runoff Characteristics", Trans. of ASCE, Vol. 105, p. 106, 1940.
29. Hossain, A., Rao, A. R. and Delleur, J. W., "Estimation Direct Runoff from Urban Watersheds", Jour. of the Hydraulics Div., pp. 169-188, 1978.
30. 建設省水文研究会編, 流出計算例題集 1, 全日本建設技術協會, p. 53, 1971
31. 日本土木學會, 水理公式集, p. 33, 1967
32. 建設部, 洛東江 및 錦江流域 洪水流出 分析 調查附錄圖書(Ⅲ), 1974
33. 建設部, 韓國水文調查年報, 1968 ~ 1972
34. 建設部, 産業基地開發公事, 韓國河川調查書, 1974