

〈論 文〉

基底流出 分離를 위한 降雨와 減水曲線간의 相關解析

An Analysis of the Relationship between Rainfall and Recession Hydrograph for Base Flow Separation

李 元 煥*

Lee, Won Hwan

金 再 韓**

Kim, Jae Han

Abstract

A method is developed for the separation of the major base flow in a river hydrograph combining the numerical techniques and the empirical methods. The linearized Boussinesq equation and the storage function are used to obtain the base flow recession. The shape of base flow curve made by the recharge of the groundwater table aquifer resulting from rainfall is determined by the Singh and Stall's graphical method, and the continuous form for the curve is approximated by the multiple and polynomial regression. This procedure was successfully tested for the separation of base flow and the establishment of hydrograph in a natural watershed. It was found that the direct numerical method applied to the homogeneous linear second order ordinary differential equation system is not suited to obtain the recession curve, and the case that the loss is generated in the partially penetrating stream can not be solved by the method of this study

要 旨

數值解法과 經驗的 方法을 合成하므로써 河川水文曲線의 基底流出을 分離하는 方法을 開發하였다. 基底流出 減水曲線에 對해서는 線形化된 Boussinesq 方程式과 貯溜函數를 適用하였으며, 또한 降雨에 의하여 地下의 帶水層에 浸透된 量이 河川으로 流入되는 基底流出의 推定에는 Singh 과 Stall의 圖式的 方法을 利用하였다. 이들에 對한 時間別 連續性은 多元的인 多項式 回歸論에 의하여 近似化시켰다. 本 研究過程을 自然河川에 成功的으로 適用할 수 있었으나, 減水曲線을 위한 同次線形 2階 常微分系의 直接的 數值解法은 不適合한 것으로 나타났으며, 損失이 發生되는 部分浸透川의 基底流量은 本 研究方法에 의하여 推定할 수 없었다.

1. 序 論

降雨로부터 發生되는 地下流入量(Ground water recharge)에 對한 時間別 基底流量推定은 直接流出算定에 直接的 關係를 가지는 것으로서 대단히 重要的 事項이라 하겠다. 이는 地下水位(Ground water table)에

關係되는 問題로서 이를 위하여는 于先 無降雨時의 先行基底流量(Underlying base flow)을 推定하여야 하겠으며, 基底流量減水曲線이 이에 該當되는 것이다.

基底流量減水曲線에 對해서는 인찌기 Barnes¹⁾가 片對數方眼紙上에서 直線的으로 推定이 可能하다고 論한 바 있으며, 이後 많은 研究者들의 研究가 發表되고 있다. 이들에 對한 1960年代 中半期까지의 研究들을

* 延世大 土木工學科

** 忠南大 工大 土木科

Hall²⁾이 詳細하게 紹介한 바 있다. 이와 같은 先行基底流量에 地下流入量이 發生하여 基底流量이 增加할 경우에는 이들에 對한 地下水面曲線의 解析이 必要하게 된다. 그러나 實際적으로 이의 解析은 地下水흐름에 의하여 이루어지는 것으로서, 地下의 여러가지 複雜한 要素들로 因하여 물의 循環過程을 根本적으로 把握하지 않는 限, 이들을 正確하게 推定하기란 거의 不可能한 狀態이다. 따라서, 基底流出의 分離는 여러 가지 假定과 近似式들에 의하여 이루어지고 있는 實情이다.^{3,4)}

基底流出에 關한 基本理論을 Singh⁵⁾이 具體적으로 論한 以來 많은 學者들이 研究하여 왔다. 卽, Singh와 Stall⁶⁾은 圖式的으로 基底流量을 推定하였으며, Birtles⁷⁾는 地下水의 2次元 理論을 Vector場의 Gauss定理를 利用하므로써 蒸散, 土壤의 含水未治量 및 帶水層의 流入量을 考慮하여 算定된 流出量과 實測值 사이에 最小自乘法를 適用시켜 基底流出을 分離하였다. 最近에는 Hino와 Hasebe⁸⁾가 日雨量을 白色雜音으로 假定하므로써 非線形의 流域系를 線形으로 各各 取扱한 地表水, 地下地表水 및 地下水의 副系(Subsystem)들에 對하여 推計學的 模型의 概念을 導入하므로써 基底流出을 分離한 바 있다. 또한 그들⁹⁾은 時間流量에 對해서는 洪水遞減部에서 分離周期를 決定하여, 貯溜函數法의 概念으로부터 얻어지는 2階常微分方程式을 Filtering 理論으로 解를 求하므로써 이를 推定하였다. 우리 나라에서는 金¹⁰⁾에 의하여 試圖되어진 바 있으며, 그는 地表面까지의 完全飽和된 時期를 河川流量上昇始點이라 假定하여 線形論을 取扱한 바 있으나, 그 結果, 基底流出의 尖頭值가 지금까지 알려진 他方法들에 比하여 時期的으로 너무 일찍 到達함을 나타내었다.

本 研究에서는 Singh⁵⁾의 數值解法의 概念과 Singh와 Stall⁶⁾의 圖式解法 및 Hino와 Hasebe⁹⁾의 貯溜函數法을 折衷하므로써, 數值解法에 의한 解析으로부터 惹起될 수 있는 結果들의 不確實性의 排除와 圖式解法과 같은 經驗的인 方法들이 要求하는 充分한 資料들이 없는 流域에서도 基底流量을 算定할 수 있도록 하였다.

2. 理想基底流出의 基本理論

一般的으로 河川으로 流入되는 地下水에 의한 理想基底흐름은 그림 1과 같은 경우를 생각할 수 있다.⁵⁾

그림 1에서 h_0 와 H_0 는 $x=0$ 와 地下水 境界인 $x=B$ 에서 不透水層에서부터의 河川水位와 非被壓帶水層(Unconfined aquifer)의 地下水位(Groundwater table

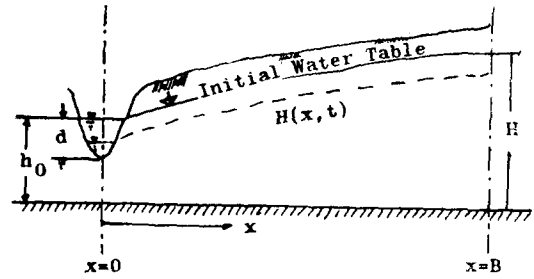


그림 1. 河川으로의 地下水흐름

혹은 Phreatic surface)를 各各 나타내며, d 는 水路 바닥에서부터 水面까지의 높이이다.

問題를 數學的으로 簡單히 하기 위하여 水理學의 特性因子들, 卽 透水係數 k , 有效空隙率 f 를, 一定하다고 取扱하는 均等(Uniform), 同質(Homogeneous) 및 等方向(Isotropic)性으로 看做한다. 이와 같은 假定은 嚴密한 意味에서 矛盾性을 가지고 있으나, 이미 여러 學者들이 實行하여 왔거나 紹介한 바 있다.^{5,11,12)} 上記條件下에서 式(1)의 Boussinesq 方程式의 項들 가운데 $(\frac{\partial H}{\partial x})^2$ 을 상당히 작은 값이라 하여 無視하고, $H \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ 의 높이 H 를 平均值인 \bar{h} 로 나타내므로써 式(2)와 같이 線形化할 수 있다.⁵⁾

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k}{f} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{k}{f} \left[H \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k}{f} \bar{h} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, 水面 $H(x,t)$ 가 計算初期에 水平, 拋物線 및 餘弦(Cosine) 등으로 假定하여 解析한다면 이들은 모두 Fourier 級數로부터 單位幅當 流量 q 를 쉽게 求할 수 있다.⁵⁾ 그러나 實際流域에 適用할 경우는 水面型을 正確하게 決定하여 주기란 어려운 實情이므로, Dooge¹³⁾는 Dupuit-Forscheimer의 假定에 根據를 두고서 減水曲線 近似式을 式(3)과 같이 나타내었다.

$$q = \frac{8k\bar{h}(H_0-h_0)}{B} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \exp\left(-n^2 \frac{j}{t}\right) \dots(3)$$

위 式에서 j 는 式을 簡便하게 하기 위하여 Kraijenhoff¹⁴⁾에 의하여 特性係數들을 式(4)와 같이 하나의 媒介變數로 取한 것이다.

$$j = \frac{1}{\pi^2} \frac{fB^2}{k\bar{h}}, \text{ 單位 : 日(day)} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, j 는 貯溜係數(Reservoir Coefficient)라고 하며, 만약 定常滲透(Steady percolation)가 無限히 持續된다면 이 係數가 貯溜되어질 自由帶水層의 地下水

(Phreatic groundwater)의 量을 決定하게 된다. 式(3)의 나머지 係數들을 j 에 關하여 整理하고, Dooge¹³⁾ 및 Brutsaert와 Nieber¹⁵⁾의 方法을 引用하면 流量 Q 를 求할 수 있다. 이때 j 以外的 나머지 係數들의 總括을 그들이 나타낸 바와 같이 하나의 變數(여기서는 V_L 이라 稱한다)로 指定해 주면, Q 는 變數 j 와 V_L 의 函數임을 알 수 있다. 따라서, 流入量 V_L 에 對한 地下水흐름은 指數型的 多項式으로 表記된다. 이와 類似한 內容으로서 Kikkawa外 2人¹⁶⁾도 論한 바 있으며, 主減水曲線을 各 副葉들의 遞減率로부터 이루어지는 數個의 指數曲線의 合成으로 나타낼 수 있다고 하였다. 그러나 降雨終了 長時間 후에는 減水曲線을 하나의 指數曲線으로 나타낼 수 있다고 한 것은 式(3)의 多項式中 基底流量의 減水曲線에서는 $n=1$ 만의 使用을 可能케 하고 있다. 이와 類似한 內容에 關해서는 여러 學者들^{13,17,18)}에 의하여 言及된 바 있다.

3. 貯溜函數法에 의한 減水曲線 推定

貯溜函數法은 이미 알려진 式이지만, 이들에 대한 具體的인 理論은 Klemes¹⁹⁾가 잘 整理한 바 있다. 流入量이 I 이고, 流出量이 y 일 때 貯溜量 S 에 의한 集中(Lumped) 模型의 連續方程式(貯溜函數)과 運動方程式(Kinematic equation)은 式(5)와 式(6)으로 各々 나타낼 수 있다.

$$I - y = dS/dt \dots\dots\dots(5)$$

$$S = Ky^m = f(y) \dots\dots\dots(6)$$

式(6)에서 K 는 貯溜常數를 뜻한다. 一般的으로 水文學的 動的系는 非線形이라 할지라도, 解析上의 어려움을 피하고 家際 利用面을 考慮하여 線形論을 適用시키고 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 이것은 비단 直接流出에서 뿐만 아니라, 地下水 理論에서도 여러 研究者들^{9,20,17)}이 適用하고 있다.

여기서는 線形인 $m=1$ 일 경우에 대하여 알아 본다. $m=1$ 일 때 式(5)와 式(6)으로부터 式(7)과 같은 1階의 非同次線形微分方程式을 얻을 수 있다.

$$K \frac{dy}{dt} + y = I \dots\dots\dots(7)$$

式(7)의 경우는 하나의 集中貯水池에 該當되는 것이나, 만약 여러개의 同一線形貯水池群으로 이루어져 있다면 勿論 高階微分方程式으로 流域系를 나타낼 수 있다. ²¹⁾ Nash²²⁾의 模型은 이의 代表的인 것이다. Hino¹⁷⁾는 洪水減水部의 曲線推定論에서 2階 以上の 項들은 無視할 수 있을 만큼 작기 때문에, 주로 1階의 項

만으로 이루어진다고 하였다. 그러나 최근 Hino와 Hasebe^{9,23)}는 貯溜와 流出에 의한 非定常效果를 考慮한 式(8)의 Prasad²⁴⁾의 非線形 2階常微分方程式을 利用하여 $m=1$ 에 該當하는 線形論으로 地下水흐름을 解析한 바 있다.

$$K_2 \frac{d^2y}{dt^2} + K_1 m y^{m-1} \frac{dy}{dt} + y = I \dots\dots\dots(8)$$

上記 式(7)과 式(8)에서 I 가 0일 때는 降雨로부터 地下流入量이 발생되지 않을 경우에 해당되며, 式(7)의 直接積分으로부터 流出量 y 가 指數的으로 減水하게 된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 따라서, 이때의 解는 式(3)의 $n=1$ 의 경우에 해당되며, 片對數方眼紙上에서 直線的인 關係가 된다. 그러나 式(8)의 경우는 直接積分하여 解를 얻을 수 없으며, 同次 2階常微分方程式의 解를 가질 수 있도록 媒介變數는 數學的인 技 法으로 決定(Identification)하여야 할 것이다.

4. 地下流入量에 의한 總基底流量

2章과 3章에서의 基本理論은 基底流量의 減水曲線에 關한 것들로서, 만약 降雨로부터 地下流入量이 發生한다면 이들에 대한 水文曲線을 先行基底流量에 合算하여 主로써 完成된 基底流出을 얻을 수 있다.

Singh²⁵⁾은 2章의 式(2)부터 式(9)와 같은 非同次微分方程式을 提示하였다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k}{f} \bar{h} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + [R(x, t)]/f \dots\dots\dots(9)$$

위 式에서 $R(x, t)$ 는 持續期間 T 동안 時間에 따라 形成되어지는 流入量의 水文曲線으로서, 非對稱分布函數와 對稱分布函數인 彎曲流入曲線(Sinusoidal recharge curve)으로 된다. 이 가운데 그는 後者の 경우에 대해서만 考慮하고, $R(x, t) = R \sin(\pi t/T)$ 로 假定하였다. 여기서, t 의 範圍는 $0 \leq t \leq T$ 이며, R 은 流入量의 最大値를 뜻한다(그림 2 參照).

또한 t_e 는 浸透 및 地下流入量의 持續期間이며, 이 浸透된 量이 毛管水帶境界(Capillary fringe)에 到達한 때 까지의 時間이 t_e 보다 길어지면 t_e 以後의 時間에서 부터 到達時間까지의 時間인 t_2 가 考慮되어야 한다.

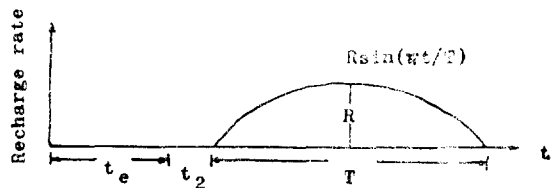


그림 2. 帶水層으로의 流入量

이후, 流入量은 地下水面에 도달하여 地下水面을 上昇케 하고, 基底時間 T 에서 끝나게 된다. 이와 같은 偏微分方程式에 대한 解는 初期 및 境界條件에 달려 있으므로 正確하게 推定하기란 쉽지 않다.

5. 本 研究方法

本 研究에서는 2章의 指數型的 多項式과 3章에서 言及한 線形論의 貯溜函數法으로 基底流量의 減水曲線을 推定한 다음, 여기에 4章의 概念에 立脚하여 降雨로부터 發生된 基底流出의 增加分을 合算해 主므로써 總基底流量을 算定코자 한다.

5. 1 指數型 多項式

無降雨時의 時間別로 減少되는 基底流量의 觀測值를 $y(k)$, 計算值를 $Y(k)$ 라고 한다. 여기서, k 는 減水曲線에서의 任意의 點($k=0$)에서부터 計算코자 하는 時間까지의 길이를 뜻하며, NY 는 끝點을 各各 나타낸다. 이들로부터 式(10)과 같은 偏差自乘合 S_d 를 만들 수 있다.

$$S_d = \sum_{k=0}^{NY} [y(k) - Y(k)]^2 \dots\dots\dots (10)$$

여기서, 算定值 $Y(k)$ 를 얻기 위하여 2章의 流量 Q 를 利用할 때, 이 式이 갖고 있는 未知數가 V_L 과 j 이기 때문에, 이 V_L 을 $k=0$ 에서의 算定值 $Y_0 [= Y(0)]$ 로 나타내므로써 Q 式은 두 變數 Y_0 와 j 로 바꿔 놓을 수 있다. 이때 V_L 을 Y_0 로 置換한 것은 數值解法上的 初期值를 쉽게 얻기 위함이다. 따라서, 式(10)에서 S_d 의 값이 變數 Y_0 와 j 에 대하여 最小가 되기 위한 條件은 Y_0 와 j 에 關하여 S_d 를 偏微分 한값을 0으로 하는 값이다. 이때 만들어진 正規方程式은 非線形性 때문에 直接的인 聯立方程式에 의하여 풀 수 없으므로 Newton-Raphson 方法²⁹⁾에 의하여 解를 求한다. 이 方法은 分布函數와 같이 方程式의 解를 直接的으로 求할 수 없을 경우의 水工學的 問題들에 대하여 一般的으로 많이 利用되고 있는 數值解法이다.^{26, 27)}

5. 2 貯溜函數法

여기서는 5.1의 方法 以外에도 式(8)의 $m=1$ 인 線形論에 해당되는 貯溜函數法의 同次 2階線形微分方程式[式(8)에서 $I=0$ 인 경우]에 關하여 媒介變數를 決定하므로써 水文曲線을 推定코자 한다. 이의 解를 求하기 위하여 Labadie 와 Dracup²⁸⁾의 媒介變數 決定法을 利用한다.

$m=1$ 이고, $I=0$ 일 때의 式(8)의 各 變數를 式(11)과 같이 나타내기로 한다.

$$Q = x_1,$$

$$\begin{aligned} dQ/dt &= x_2, \\ C_1 (= K_1/K_2) &= x_3, \\ C_2 (= 1/K_2) &= x_4 \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

따라서,

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= x_2, \\ dx_2/dt &= -x_3x_2 - x_4x_1, \\ dx_3/dt &= 0, \\ dx_4/dt &= 0 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

위 式의 聯立微分方程式은 非線形을 內包하고 있기 때문에, 이의 解를 求하기 위하여 Newton-Raphson-Kantrovich 法이라고 불리는 準線形化(Quasi-linearization) 方法을 利用한다. 이 方法은 1960年代 中半期에 Bellman 과 Kalaba 에 의하여 一般化되어진 것^{29, 30)}으로서, 變數 x 의 非線形函數 $f(x)$ 는 任意의 點 x_0 에 關하여 Taylor 級數의 1次項까지만 考慮한 $f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0)$ 로서 近似化할 수 있다. 變數 x 를 函數 $x(t)$ 까지 擴張하여 非線形函數를 다음 式으로 近似化한다.

$$\begin{aligned} f(x(t), t) &\approx f(x_0(t), t) \\ &+ (x(t) - x_0(t))f'_{x_0}(x_0(t), t) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

여기서 f'_{x_0} 는 函數 f 의 x_0 에 關한 微分을 나타낸 것이다.

Labadie 와 Dracup 는 準線形化法과 最小自乘法을 組合하여 式(13)을 利用하므로써 式(8)의 媒介變數를 決定하였다. 이에 대한 式의 展開는 그들 또는 Hino²⁹⁾가 詳述한 바 있으므로 여기서는 생략하고, 計算過程만 列擧하기로 한다.

① Hamming 의 Predictor-Corrector 方法을 利用하므로써 時間別(t_k) $x_i(t_k)$ ($i=1, 2, 3, 4$)를 求하고, 이때 一般解가 갖고 있는 常數를 反復初期($n=0$)에 指定해 주기 위하여 Labadie 와 Dracup 의 方法을 利用한다.

② ①에서부터 求한 $x_i^{(n+1)}(t_k)$ 로서 特殊解와 同次解의 常數를 時間別로 算定한 後, 最小自乘法의 原理로부터 式(11)의 $t_k=0$ 의 값들을 求한다. 여기서 一般解는 特性方程式으로부터 決定된다.

③ ②에서 求한 값들의 修正前後 差의 絕對值가 收斂限界內에 들어 오면 採擇하고, 그렇지 않으면 앞의 方法을 되풀이 한다.

여기서 適用된 Runge-Kutta 및 Hamming 의 數值解法은 既存 Program²⁵⁾을 利用하였다. 一般的으로 Hamming 方法은 相當한 正確성과 安定성이 있는 長點이 있다고 알려져 있다.³¹⁾

5. 3 總基底流量 算定

5. 1 과 5. 2 의 方法으로부터 先行基底流量을 求한 後, 4章의 理論에 立脚하여 總基底流量을 算定키로

한다. 4章의 式(9)를 數值解法에 의하여 解를 얻고자 할 때는 初期 및 境界條件들에 對한 어려움을 內包하고 있기 때문에, 그림 2의 T 以後는 Singh와 Stall⁶⁾의 圖式의 方法에 의하여 基底流出量을 算定하고, 이들에 對한 連續적인 時間別 基底流量 $Q_b(t)$ 는 式(14)와 같이 5. 1 또는 5. 2의 方法으로부터 求한 先行基底流量 $Q_{ub}(t)$ 와 多元回歸論의 多項式을 結合하여 推定하기로 한다. 여기서 T 의 始點은 $Q_{ub}(t)$ 와 $Q_b(t)$ 의 값의 一致點이다.

$$Q_b(t) = Q_{ub}(t) + \sum_{j=1}^N \beta_j x_j(t - \tau) \dots \dots \dots (14)$$

위 式에서 N 과 β_j 는 多項式的 끝項까지의 項數와 回歸係數를 各各 나타내며, τ 는 $t=0$ 에서부터 T 의 始點까지의 時間길이이다. 또한 $x_j(t)$ 는 N 個의 다른 變數를 뜻하며, 一般의 多項式에서 보여 주는 것처럼 t^j 로 둘 수 있다.^{25, 32)} 이때 式(14)의 右便 두 번째 項인 多項式的 값은 $t-\tau$ 가 0보다 적거나 같으면 0의 값을 가진다. 또한 T 의 끝點은 $Q_b(t)$ 가 後尾 流出 減水曲線과 一致되는 點에서 끝난다.

水文曲線을 作成하기 위한 各種 多項式的 適用은 Amorocho와 Brandstetter³²⁾를 비롯하여 많은 研究者들에 의하여 이루어지고 있다.

式(14)의 係數 β_j 를 求하기 위하여 既存 Program²⁵⁾을 利用하였다.

6. 適用例 및 檢討分析

本 研究에서는 먼저 無降雨時의 基底流量의 減水曲線에 對한 研究가 遂行되어졌다는 點에서, 이의 適用結果를 分析하기 위하여는 比較적 精度가 높게 觀測된 長時間의 減水部 流出量을 必要로 한다. 뿐만 아니라, 이를 위하여는 自然河川의 減水量이 上流部의 貯水池로부터 水門에 의한 流量調節이나, 發電 및 여러 경우의 用水에 의한 取水의 影響이 거의 없다고 볼 수 있는 流域을 選定하여야 한다. 따라서, 本 研究에서는 觀測地點의 器機 및 觀測者가 明確하게 밝혀진 洛東江과 錦江의 建設部 資料^{33, 34)}를 使用하였으며, 上記目的을 充足시키기 위하여 兩大江의 多目的 댐들이 築造되기 前인 1974年度 以前의 資料들을 使用하였다. 또한 減水曲線은 氣象條件에 의한 蒸發散 및 地下의 土壤狀態에 크게 左右되므로, 이를 考慮한다면 우리나라는 一年中 5月에서부터 10日 사이의 夏節期와 나머지 冬節期로 크게 나눌 수 있을 것이다. 本 研究에서는 研究內容分量上 夏節期의 資料에만 局限하였으며, 冬節期에 對해서는 追後 研究가 進行되어야 할 것이다.

6. 1 對象流域 및 減水部 選定

本 研究에서 適用例로 選定된 流域은 洛東江水系의 東村 및 錦江水系의 龍潭이며, 面積은 各各 1,543.9 및 937.0 km²이다. 또한 降雨에 對한 檢討는 各流域 內 關聯된 雨量觀測點^{33, 34)}을 參考로 하였다.

流出의 減水部 解析에는 直接流出의 有·無의 두 가지 경우에 對하여 論할 수 있으나, 總水文曲線에서 直接流出의 끝點 推定은 아직까지 明確하게 밝혀지지 못하고 있는 實情이므로 本 研究에서는 既往의 方法들^{15, 18, 35)}을 參考로 하여 降雨終了 約 5日 以後로 하였다.

資料의 選定에 있어서는 水位-流量關係의 獲得이 可能한 日流量(每日 午前 10時에 測定된 값, 單位 m³/sec)을 對象으로 하였으며, 그 內譯은 다음과 같다.

東村: ① 1969年 6月 10日~24日, ② 1969年 8月 12日~18日, ③ 1971年 6月 18日~26日, ④ 1972年 7月 16日~22日.

龍潭: ⑤ 1971年 9月 30日~10月 10日, ⑥ 1972年 6月 17日~25日, ⑦ 1972年 7月 16日~23日.

6. 2 資料分析과 河川概況

上記 資料들의 1次分析結果로부터 東村의 경우는 部分浸透川(Partially penetrating stream)의 現象이 뚜렷했으며, 大體로 流量이 5 m³/sec 以下로 減少되었을 때, 理想基底流出으로부터 아래 쪽으로 顯著하게 分離됨을 알 수 있었다. 그 例로서 1972年 7月 16日~22日을 들 수 있다(그림 3 참조).

이와 같은 경우에는 各種 損失이 發生하고 있다는 것을 알 수 있었다.⁵⁾

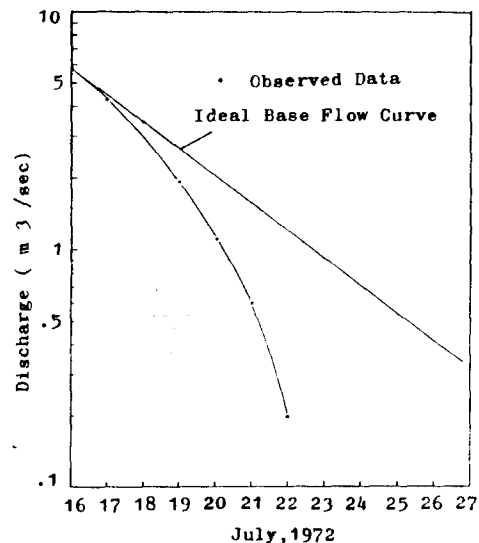


그림 3. 東村 1972년 7월 16일~22일의 減水曲線

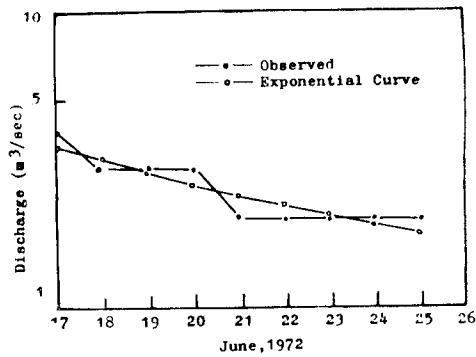


그림 4. 龍潭 1972년 6월 17일~25일의 減水曲線

龍潭의 경우에는 東村과는 對照의으로 그림 4에서와 같이, 資料 ⑥番의 流量이 片對數方眼紙上에서 指數曲線에 가깝게 減少하고 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 龍潭地點이 完全浸透川(Fully penetrating stream)의 可能性⁶⁾을 強하게 示唆해 주고 있는 것이다.

6. 3 基底流出 減水曲線

여기서는 降雨로부터 地下流入量에 의한 基底流出을 算定하기 前에 5. 1과 5. 2의 先行基底流量 減水式을 檢討해야 한다.

5. 1의 指數型 多項式의 n 을 1에서부터 增加시켜 가면서, 各 n 에 對한 減水量을 算定하였다. 그 例로서 龍潭地點의 1971年 9月 30日~10月 10日의 資料에 對한 結果들을 提示한 것이 表 1과 같다.

表 1에서 提示한 바와 같이, 降雨終了 5日後의 大部分의 減水曲線들은 Log-1 cycle 內에서 $n=1$ 에 의하

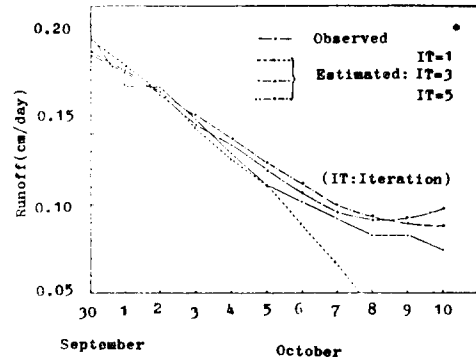


그림 5. 貯溜函數法에 의한 龍潭 1971년 9월 30일~10월 10일의 流量 算定值

여 推定될 수 있음을 알 수 있다.¹¹⁾ 그러나 東村의 ③과 ④番 資料들과 같이 損失이 發生된다고 看做되는 경우의 減水曲線은 本 研究의 方法으로 推定할 수 없었으며, 이들에 對해서는 별도의 研究가 遂行되어야 하리라 判斷된다.

5. 2의 貯溜函數法에 의한 減水曲線式을 表 1의 觀測值에 對하여 適用하여 보았다. 獲得되어진 結果들은 表 2와 같다.

그림 5는 이들에 의한 流量 算定值를 나타낸 것이다.

貯溜函數法에 의한 5. 2의 基本式이 自由振動系(Free oscillation system)에 對한 것으로서, 이들에 適用한 本 研究方法의 直接的 數值解法으로 非振動型의 結果를 期待한다는 것은 無理임을 알 수 있었다. 따라서,

表 1 龍潭地點의 指數型 多項式에 의한 日流量 算定值 (1971年) (單位 m³/sec)

項目	月 日	10										偏 差 絕對值平均	
		9 30	1	2	3	4	5	6	7	8	9		10
觀 測 值		21	18	18	16	14	12	11	10	9	9	8	--
$n = 1$ (單純線形回歸)		20.9	18.9	17.1	15.4	14.0	12.6	11.4	10.3	9.3	8.4	7.6	0.46
$n = 3$		21.5	18.7	16.5	14.7	13.3	12.2	11.3	10.5	9.8	9.3	8.8	0.69
$n = 99$		21.6	18.7	16.4	14.7	13.3	12.2	11.3	10.5	9.9	9.3	8.9	0.73

表 2 反復施行回數別 結果值 ($t_k=0$ 일 때)

變 數	回 數	1	2	3	4	5
x_1		0.19173	0.19194	0.18550	0.19273	0.18363
x^2		0.01221	0.01804	0.00914	0.24970	0.00825
x^3		0.02804	-0.0304	-0.00501	0.01079	-0.00131
x^4		0.01413	-0.0063	-0.01260	-0.04044	-0.01501

表 2에서 나타난 바와 같이, 反復施行回數가 增加함에도 不拘하고 收斂하는 現象은 나타나지 않았으며, 假定值를 달리하였어도 똑 같은 結果를 發生시켰다. 또한 觀測值와의 拘束條件이 끝나는 10月 10日 以後부터는 甚한 振動이 發生되었으며, 式(11)에서 常數 C값의 陽(+)의 保障이 어려웠다. 따라서 이를 위하여는 Hino 와 Hasebe^{8,9)}의 非振動型의 Filtering 方法들이 勸獎되고 있으며, 앞으로 繼續되어져야 할 問題라 하겠다.

6. 4 地下流入量에 의한 基底流出量(여기서는 前節에서 使用되지 않았던 任意的 資料에 對하여 降雨로부터 發生된 地下流入量에 의한 基底流出量을 算定하므로서 本 研究의 實用性을 檢討分析코자 한다. 選定된 資料는 龍潭의 1971年 8月 25日~9月 16日의 水文量이다.

Singh 과 Stall의 方法은 片對數方眼紙上에서의 直線化에 根據를 두고 있으므로, 正確한 直線의 기울기를 얻기 위하여는 可能한 限 流量의 算定值와 觀測值의 正確性이 要求된다. 그러므로 時間에 따른 流出變化量의 微小值가 要求되나, 建設部資料^{33,34)}로서는 이의 直接 解決이 不可能하였다. 따라서, 本 研究에서는 水位와 流量을 建設部資料³⁴⁾로부터 全對數方眼紙에 直接 圖解하여 水位-流量曲線을 作成하므로써 이를 推定코자 하였다. 龍潭 1971年 8月과 9月의 減水量 가운데 6~55 m³/sec의 流量(Q)들은 水位(H)에 대하여 相關係數 r=0.998로서 完全直線에 가까왔으며, 이때 獲得된 曲線式은 式(15)와 같다.

$$Q = 92.13881H^{1.37534} \dots \dots \dots (15)$$

上記 資料에 Singh 과 Stall의 方法을 適用하였을 때, 9月 16日~20日의 流量들로부터 基底流出 貯溜遲滯係數(Storage delay factor) K_b는 51.6日을 얻을 수 있었으며, 이것에 의하여 9月 6日~16日의 流量資料로부터 直接流出 貯溜遲滯係數 K_s을 6.7日로 決定할 수 있었다. 또한 變曲點(Inflexion point)을 求하기 위하여 差分型인 $\frac{\Delta}{\Delta t} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)$ 를 使用하여 그 값이 0이 되는 곳을 取하였다. 이때 時間差 Δt는 1日이다.

以上の 結果들로부터 獲得되어진 最終水文量은 表 3과 같다.

여기서, 尖頭基底流量 發生時間(T_{BP})와 크기(Q_{BP})는 다음과 같이 하여 決定하였다. 流量曲線은 片對數方眼紙上의 짧은 時間範圍內에서 直線에 가까운 값을 얻을 수 있으므로, 9月 9日~14日과 12日14日의 Q_b를 各各 片對數方眼紙上에 直線化하여, 이들의 만나는 點을 T_{BP}와 Q_{BP}에 對한 近似值로 使用하였다. 이렇게 하여 求한 尖頭值는 9月 11日 5時頃의 約 9.2m³/

表 3 Singh 과 Stall의 方法으로부터 求한 水文量 (龍潭 1971年 9月)

日	直接流出量 Q _s	總流出量 Q _T	基底流出量 Q _b =Q _T -Q _s
6	21.3	26.1	4.8
7	15.1	20.1	5.0
8	10.7	16.8	6.1
9	7.6	13.7	6.1
10	5.4	12.9	7.5
11	3.8	12.9	9.1
12	2.7	11.5	8.8
13	1.9	10.1	8.2
14	1.4	9.4	8.0

sec이다.

끝으로, 위에서 求한 條件들로부터 5. 3의 理論에 의하여 完成된 基底流出 水文曲線을 求한다. 이를 위하여 먼저 5. 1의 方法으로부터 8月 25日~9月 3日의 減水量 資料에 대한 變數 Y₀와 j를 求하였다. 分析結果 그림 6에 나타난 바와 같이, n=3일 때의 算定值가 觀測值와의 誤差를 最小로 하였으며, n=1인 경우에는 상당한 誤差를 誘發하였다. 따라서, 이 減水曲線은 直接流出의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 그러나 n이 3보다도 큰 경우에는 減水曲線의 後尾部分이 實際값보다 크게 나타났으므로, 直接流出의 영향이 過大하게 考慮되고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 最終的으로 얻어진 Q_{ub}(t)는 式(16)과 같다.

$$Q_{ub}(t) = 64.9 \left(\frac{1}{2} \sum_{n=1,3}^3 e^{-\frac{n^2}{9.1}} \right) \dots \dots \dots (16)$$

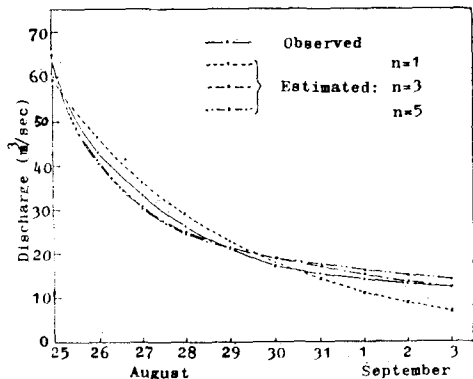


그림 6. 指數型 多項式에 의한 龍潭 1971년 8월 25일~9월 3일의 流量 算定值

表 4 最適 多項式 係數

次 數	1	2	3	4
係 數	-51.8986048	7.323710575	-0.287100675	3.454276994 × 10 ⁻³
次 數	5	6	7	8
係 數	-3.553261653 × 10 ⁻⁴	1.772963475 × 10 ⁻⁵	1.097774512 × 10 ⁻⁷	-1.100479099 × 10 ⁻⁸

表 5 最終的으로 獲得된 基底流量 (龍潭 1971年 9月)

日	(1)	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Q _T	(2)	13.7	12.9	12.9	11.5	10.1	9.4	8.1	7.4	6.8
Q _{ub}	(3)	6.2	5.6	5.0	4.5	4.0	3.6	3.2	2.9	2.6
Q _b	(4)	6.2	7.6	9.0	9.0	8.2	7.4	6.9	6.8	6.3
	(5)	6.2	7.5	9.1	8.8	8.2	8.0	7.1	6.7	6.3

여기서 t 의 起點은 8月 25日 午前 10時이며, 以後 1日에 1씩 增加하게 된다.

5.3의 理論에 의하여 式(14)의 右便 두 번째 項의 多項式의 係數를 求하였을 때, 그 結果들로부터 最適 值로 採擇된 係數들은 表 4와 같다.

以上の 結果로부터 最終的으로 求한 값들을 提示하면 表 5와 같다. 表 5에서 (2)行의 Q_T 는 觀測總流出量이고, (3)行의 Q_{ub} 는 式(16)으로부터 算定된 先行 基底流量이며, (4)行과 (5)行의 Q_b 는 (3)行과 表 4의 係數들로부터 式(14)와 圖式의 方法에 의하여 各各 求한 基底流量이다. 따라서, 이들로부터 總水文曲線에서 直接流出과의 分離를 나타낸 것이 그림 7과 같다.

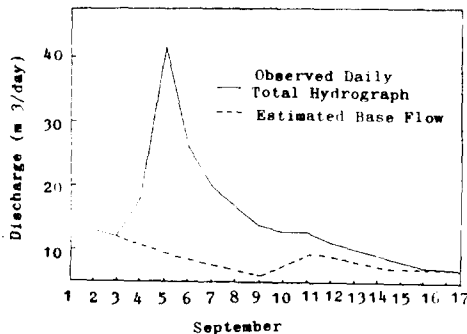


그림 7. 最終 決定된 基底流出分離

7. 結 論

本 研究는 降雨로부터 發生된 地下水 흐름이 基底流

出에 미치는 時間別 量을 推定코자 하였다. 이를 위하여 線形論의 數值解法과 經驗的인 圖式의 既存理論을 利用하였다. 本 研究內容의 實用性을 檢討하기 위하여 洛東江水系의 東村과 錦江水系의 龍潭地點의 日流量資料를 適用하였으며, 얻어진 結果는 다음과 같다.

(1) 東村은 部分浸透川에 비해 龍潭은 完全浸透川의 傾向을 보여 주었다.

(2) 指數型 多項式에서 直接流出의 影響을 받는 減水曲線의 推定은 n 이 1보다 클 경우에 可能하였다.

(3) 貯溜函數法의 同次 2階線形微分方程式에 對한 直接的 數值解法으로는 非振動型의 減水曲線의 獲得이 不可能하였다.

(4) 降雨에 의한 基底流出의 增加分은 Singh 과 Stall의 圖式의 解法에 의하여 推定이 可能함을 再確認할 수 있었으며, 多項式에 의하여 時間別 增加分들에 대한 回歸方程式의 設定이 可能하였다.

(5) 部分浸透川의 損失이 發生되는 경우의 減水曲線은 完全浸透川의 그것과는 크게 다르며, 損失에 대한 別途의 媒介變數를 考慮하여 解析함이 妥當하다고 본다.

謝 辭

本 研究는 韓國科學財團의 1984年度 前半期 研究課題 支援費에 의하여 遂行되어 졌으며, 이에 謝意를 表한다.

参 考 文 献

1. Barnes, B.S., "Discussion of Analysis of Runoff Characteristics," Trans. ASCE, 105, p.106, 1940
2. Hall, F.R., "Base-Flow Recessions-A Review," Water Resour. Res., 4(5), pp.973~983, 1968
3. 尹龍男, 水文學, 清文閣, pp.190~194, 1983
4. 鮮于仲皓, 水文學, 東明社, pp.169~174, 1983
5. Singh, K.P., "Some Factors Affecting Base-flow," Water Resour. Res., 4(5), pp.985~999, 1968
6. Singh, K.P., and J.B. Stall, "Derivation of Base Flow Recession Curves and Parameters," Water Resour. Res., 7(2), pp.292~303, 1971
7. Britles, A.B., "Identification and Separation of Major Base Flow Components from a Stream Hydrograph," Water Resour. Res., 14(5), pp.791~803, 1978
8. Hino, M. and M. Hasebe, "Analysis of Hydrologic Characteristics from Runoff Data-A Hydrologic Inverse Problem," J. Hydrol., 49, pp.287~313, 1981
9. Hino, M., and M. Hasebe, "Identification and Prediction of Nonlinear Hydrologic Systems by the Filter-Separation Autoregressive (AR) Method: Extension to Hourly Hydrologic Data," J. Hydrol., 68, pp.181~210, 1984
10. 金再韓, "物理的 特性들을 위한 降雨斗 基底流出의 線形解析", 大韓土木學會論文集, 第3卷 第4號, pp.47~57, 1983
11. Rorabaugh, M.I., "Estimating Changes in Bank Storage and Ground-water Contribution to Stream," World Meteorological Organization and Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Publ. 63, pp.432~441, 1963
12. Rovey, C.E.K., Numerical Model of Flow in a Stream-Aquifer System, Hydrology Papers, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, p.2, 1975.
13. Dooge, J.C.I., Linear Theory of Hydrologic System. U.S. Dep. Agr. Tech. Bull., 1468, pp.283~291, 1973.
14. Kraizenhoff van de Leur, D.A., "A Study of Non steady Groundwater Flow, with Special Reference to A Reservoir Coefficient," Ingenier, 70(19), pp.B 87~94, 1958
15. Brutsaert, W., and J.L. Nieber, "Regionalized Drought Flow Hydrographs from A Mature Glaciated Plateau," Water Resour. Res., 13(3), pp.637~643, 1977
16. 吉川秀夫, 砂田憲吾, グェン・ソン・フン, "洪水流量遞減曲線の特性を考慮した流出モデルに關心する研究", 日本土木學會論文報告集, 第283號, pp.23~32, 1979
17. 日野幹雄, "降雨流出の modeling-降雨および流出特性逆推定の手法一," 水工学シリーズ 81-A-9, 日本土木學會水理委員會, pp. A-9-1~14, 1981
18. 高橋 裕, 安藤義久, 伊藤 考, 伊藤和央, "山地河川の低水流出の減水特性に関する研究," 日本土木學會論文報告集, 第337號, pp.75~82, 1983
19. Klemesš, V., "Physically Based Stochastic Hydrologic Analysis," In: V.T. Chow (Editor), Advances in Hydrosience, 11. Academic Press, New York, pp.285~355, 1978
20. Dooge, J.C.I., "The Routing of Groundwater Recharge through Typical Elements of Linear Storage", Intern. Assoc. Sci. Hydrol., General Assembly of Helsinki, Publ. 52, pp.286~300, 1960.
21. 藤田睦博, "線形系の解析", 水工学シリーズ 75-A-1, 日本土木學會, 水理委員會 pp. A-7-1~23, 1975
22. Nash, J.E., "A Unit Hydrograph Study, with Particular Reference to British Catchments," Proc. I.C.E., 17, pp.249~282, 1960
23. 日野幹雄, 長谷部正彦, "フィルター分離AR法による非線形流出系の同定と豫測(時間單位)", 日本土木學會論文報告集 第324號, pp.83~94, 1982
24. Prasad, R., "A Nonlinear Hydrologic System Response Model," J. Hydraul. Div., ASCE, 93 (HY4), pp.201~221, 1967
25. Carnahn, B., H.A. Luther, and J.O. Wilkes, Applied Numerical Methods, John Wiley & Sons, Inc., pp.319~329, pp.361~404, pp.573~584 1969
26. Mejía, J.M., and I. Rodriguez-Iturbe, "On the Synthesis of Random Field Sampling from the Spectrum: An Application to the Generation of Hydrologic Spatial Processes," Water Resour. Res., 10 (4), pp.705~711, 1974.
27. Isaacs, L.T. and K.G. Mills, "Linear Theory

- Methods for Pipe Network Analysis*," J. Hydraul. Div., ASCE, 106 (HY7), pp.1191~1201, 1980.
28. Labadie, J.W., and J.A. Dracup, "Optimal Identification of Lumped Watershed Models," Water Resour. Res., 5(3), pp. 583~590, 1969.
 29. 日野幹雄, "非線形流出解析および適應流出豫測," 水工學シリーズ 75-A-8, 日本土木學會水理委員會, pp. A-8-1~31, 1975.
 30. Bellman, R.E., H.H. Kagiwada and R.E. Kalabal "Quasilinearization and the Estimation of Time Lags", Memorandum RM-4990-NIH, RAND Corporation, Santa Monica, California, pp. 1~10, 1966.
 31. Gerald, C.F., *Applied Numerical Analysis, 2d ed.*, Addison Wesley, p.284, 1978.
 32. Amorocho, J., and A. Brandstetter, "Determination of Nonlinear Functional Response Functions in Rainfall-Runoff Process," Water Resour. Res., 7(5), pp.1087~1101, 1971.
 33. 건설부, 낙동강 및 금강유역 홍수유출분석조사 부록도서(I), (II), 1974.
 34. 건설부, 한국수문조사년보, 1969~1972.
 35. Linsley, R.K., M.A. Kohler, and J.L.L. Paulhus, *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, New York, pp.156~158, 1958.