

## Saint-Venant 公式에 의한 開水路의 地下水性分 追跡

Routing of Groundwater Component in Open Channel

金 再 韓\*  
Kim, Jae Han

## Abstract

The rates of infiltration contributed to the flow of water in an unconfined aquifer under the partially penetrated stream at an ungaged station and the corresponding base flow in channel are coupled by using the hydraulic and/or hydrologic characteristics obtained from the geomorphologic and soil maps. For the determination of groundwater flow, the linearized model which is originally Boussinesq's nonlinear equation is applied in this study. Also, a stream flow routing model for base flow in channel is based on a simplification of the Saint-venant. The distributed runoff model with piecewise spatial uniformity is presented for obtaining its solution based on a finite difference technique of the kinematic wave equations. The method developed in this study was tested to the Bocheong watershed (area : 475.5 km<sup>2</sup>) of the natural stream basin which is one of tributaries in Geum River basin in Korea. As a result, it is suggested that the rationality of hydro-graph separation according to a wide variability in hydrogeologic properties be worked out as developing the physically based subsurface model. The results of the present model are shown to be possible to simulate a base flow due to an arbitrary rate of infiltration for ungaged basins.

## 要 旨

未計測流域에서의 시간별 降雨로부터 部分浸透川下の 非被壓帶水層內的 地下水흐름에 기여하는 침투량과, 이로 인하여 발생하는 河川水路上에서의 시간별 基底流量的 同時的 結合이 地形圖나 土壤圖로부터 획득된 水理 및 水文 特性因子들에 의하여 遂行되었다. 地下水흐름과 이의 開水路上的 흐름추적은 Boussinesq의 非線形方程式을 線形化한 技法과 St. Venant의 간편화 공식을 각각 이용함으로써 결정되어졌다. 이의 解를 위한 流出模型은 全流域을 분할한 分布模型을 사용하였으며, 數值解法은 運動波方程式의 有限差分法을 이용하였다. 그 결과로서, 水文地質의 多變性에 따른 水文曲線分離의 合理性은 物理的으로 바탕을 둔 地下地表水の 모형을 개발함으로써 이루어져야 한다고 提案된다. 본 연구의 實河川流域에 대한 적용 예로서는, 錦江水系內 支流인 報靑川流域을 選定하였으며, 그 결과로부터 본 技法은 미계측유역에서의 강우의 지하침투량에 의한 기저유량을 模擬發生시킬 수 있으리라 판단된다.

\* 正會員 · 忠南大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

## 1. 序 論

降雨가 地表에 도달한 다음에 이의 地表 및 地下의 動的舉動을 完全하게 규명할 수 있는 방법은 불행하게도 지금까지 발표된 바가 없다. 그러나, 최근에는 이에 대한 좀 더 명확한 物理的 性질들을 論해주고자 많은 연구들이 활발히 進行되고 있다. 그 대표적인 것 가운데 하나가 Chorley<sup>(1)</sup>와 Kirby<sup>(2)</sup>의 hillslope hydrology의 이론을 들 수 있다. 이들은 hillslope의 물의 순환과정 성분들을 구체적으로 論해주므로써, 강우가 지하에 침투된 후의 지하의 깊이별로 하천출구점까지의 시간별 流出率을 推定한 바 있다.

강우로부터 地下浸透水 이론은 非飽和帶와 飽和帶로 크게 구별될 수 있으며, 地下地表水는 비포화 대에서의 지하수 흐름이 이에 해당된다. 그러나, 浸漏(percolation)에 의하여 포화대인 지하수면에 도달하게 된 강우는 通稱 基底流出에 영향을 미치는 것으로서, 이들의 해석으로부터 강우발생 長時間後의 河川水路內의 기저유출의 시간별 흐름추적이 가능하다.

Singh<sup>(3)</sup>과 Freeze<sup>(4)</sup>는 水文特性因子들이 일정하다고 간주할 수 있는 하나의 균일한 모형들에 대하여 여러가지 水文學的 요인들에 따른 水文曲線의 변화를 質的 量的으로 각각 규명한 바 있다. 그러나, 본 연구에서는 강우로부터 惹起된 지하침투량이 지하수에 의하여 하천수에 어떻게 기여되는가를 單一모형이 아닌 分布型모형에 의하여 추정코자 한다. 따라서, 여기서는 實河川流域을 여러개의 小流域으로 분할하여, 각 소유역별로 수문특성인자들을 지형에 따라 달리하여 주므로써 실제 자연유역에서의 지하수에 의한 기저유출과 하천수와 의 결합(coupling)을 연구코자 하였다. 또한, 적용된 모형들의 媒介變數들에 관한 水文 및 水理學的 특성인자들을 토양도나 지형도들만에 의하여 결정할 수 있도록 하므로써 未計測流域에서의 침투량과 기저유출을 동시에 模擬할 수 있도록 하였다.

內容面에서는 실용성을 고려하여, 그 해법이 非線形論에 비하여 간편한 線形論에 국한한다. 기저유출의 해석을 위하여는, 먼저 지하수흐름에 관한 분석이 이루어져야 하므로, 이를 위하여 지하수의

Boussinesq의 非線形方程式을 일흐름 또는 확산방정식의 형으로 선형화한 1차원의 模形解<sup>(3,5)</sup>를 인용한다. 이 모형에 대한 수문학적 매개변수들의 결정은, 분할된 각 소유역별로 等方性 및 均質性의 가정하에<sup>(3,6,7)</sup> 이루어진다.

각 소유역별로부터 하천에 유입되는 시간별 지하수흐름이 하천수로를 따라 출구점까지의 追跡은 St. Venant공식에 의한 運動波(kinematic wave)이론에 의하여 결정된다.

강우로부터의 유출, 수심이 얇은 開水路, 氾濫原(flood plain)內의 하천수 및 홍수 등과 같은 不定流흐름 해석을 위하여 1889年 Massau의 特性線 개념의 圖式的 적분법이 시초로 알려져 있다<sup>(8)</sup>. 그러나, 실제적으로 부정류흐름 해석을 위한 支配方程式의 解를 얻기 위하여 요구되는 조건들이 입수되지 못할 경우가 往往 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 그 解法自體가 너무 복잡하여 실용화할 수가 없을 때도 있다. 따라서, Lighthill과 Whitham<sup>(9)</sup>에 의한 운동파이론은 解의 간편성을 위한 대표적인 것으로서 以後 지금까지 이에 관한 數많은 연구들이 遂行된 바 있다. 이와 같은 見地에서, 본 연구에서도 운동파이론의 간편화 방법에 의하여 지하수에 의한 기저유출이 하천수로를 따라 출구점까지 어떻게 추적되는가를 有限差分法<sup>(10)</sup>을 이용하므로써 결정한다.

본 연구를 수행하기 위하여 수로모형화는, Kibler와 Woolhiser<sup>(11)</sup> 및 Borah의 2人<sup>(12)</sup> 등에 의하여 시도된 바 있는 技法을 적용한다. 이는 하천수로를 여러 개의 線要素로 구분한 다음, 각 요소별로 水理學的 특성치들이나 수로의 측방유입량은 분할된 하천요소내에서 일정하다고 가정한 것이다. 또한, 支流에 의한 主川으로의 유입량은 초기나 경계조건으로 주어진다.

## 2. 地下水흐름의 基本理論과 適用方法

그림 1과 같은 不透水層上的 하천수로에서 地下水位  $h$ 가 거리  $x$ 에 따라서 경사  $\partial h/\partial x$ 가 작고 평균수위  $h$ 가 고려될 수 있는 경우에 대해서는, 식 (1)과 같은 非被壓帶水層(unconfined aquifer)의 線形化 이론을 적용할 수 있다<sup>(3, 13, 14)</sup>.

$$\partial h/\partial t = K\bar{h}/f\partial^2 h/\partial x^2 \quad (1)$$

여기에서,  $t$ 는 시간,  $K$ 는 포화된 흙의 Darcy의

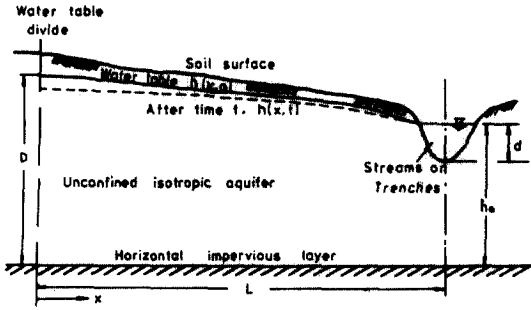


그림 1. 非被壓帶水層의 地下水흐름 概要圖

투구계수이며,  $f$ 는 흙의 排水可能控除度(drainable porosity of soil)를 각각 뜻한다. 또한, 그림 1에서  $d$ 는 배수로의 수로바닥에서부터 水面까지의 수심을 뜻하며, 이  $d$ 가 수심  $h(x, t)$ 에 비하여 상대적으로 상당히 작기 때문에, 시간에 따른  $d$ 의 변화를 통상 무시하는 경향이 있으며, 이와 같은 경우에는 시간변화에 관계없이  $h_0$ 를 일정한 값으로 간주할 수 있다<sup>(3)</sup>. 여기서,  $h_0$ 는 불투수층에서부터 水路水面까지의 높이를 일컫는다. 이 이론의 기본원리는 1863년에 불란서의 Dupuit에 의하여 처음으로 소개된 후 지금까지 여러 가정들에 의한 근사해법들이 널리 이용되고 있다. 식 (2)는 지하수가 하천수로의 측방향으로 유입되는 수로단위길이상 유량  $q$ 를 얻을 수 있는 근사해법들 가운데 하나로 알려져 있다<sup>(3, 7)</sup>.

$$q = \frac{4K\bar{h}(D-h_0)}{L} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{(n\pi)^2} \exp\left(-\frac{n^2\pi^2 K\bar{h}}{4fL^2} t\right) \quad (2)$$

여기서,  $D$ 는 地下水位分水界에서의 水位를 뜻하며,  $L$ 은 분수계에서부터 수로폭의 중앙까지의 거리를 나타낸다.

식 (2)에서의 媒介變數들은 유역의 水文學的 특성인자들에 의하여 결정되어지는 것으로서, 시간적으로나 공간적으로 상당한 可變性을 갖기 때문에 실제적으로 이의 정확한 추정에는 많은 어려움을 내포하게 된다. 이와 같은 見地에서, Brutsaert와 Nieber<sup>(7)</sup>은 上記 불확실한 변수들의 값을 결정코자 기저유출의 감수량자료들을 이용한 圖式的 새로운 기법을 제시하였다. 그 결과로서, 지하수감수곡선

해석을 위하여 선형모형의 적용가능성을 배제하지는 않았다. 따라서, 본 연구에서는 연구목적의 취지에 부합코자 선형화한 Boussinesq 방정식의 解인식 (2)를 인용키로 한다.

유역을 여러 개의 소유역으로 구분하였을 때, 임의의 소유역에 대한  $L$ 을 구하기 위하여 Brutsaert와 Nieber가 제시한 식 (3)의 방법을 적용키로 한다.

$$L_e = \phi_e a_e / (2l_e) \quad (3)$$

여기서,  $a$ 는 排水面積,  $l/a$ 는 排水路密度,  $\phi$ 는 지하수가 하천수에 기여하는 帶水層下の 面積을 全流域面積과의 比로서 나타낸 分數이며,  $l$ 은 모든 支流나 本流의 소유역별 總距離를 뜻한다. 또한, 添字  $e$ 는 분할된 임의의  $e$ 번째 소유역을 뜻한다.

無降雨時 지하수만에 의하여 시간에 따라서 하천에 식 (2)와 같은 유량이 유입되고 있을 때에, 강우에 의한 지하유입량(groundwater recharge)이 地下水位에 발생된다면 그림 1의  $h(x, t)$ 가 순간적으로 상승되며, 이로 인한 기저유량의 증가분이 고려되어야 한다. 이를 위하여 Singh<sup>(8)</sup>은 유입수문곡선을 正弦曲線(sine curve)으로 가정하여 식 (4)와 같이 근사화하였다.

$$R(x, t) = R_p \sin(\pi t/T), \quad 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

식 (4)의 右便項  $R_p$ 는 유입수문곡선의 最大縱距值를 뜻하고,  $T$ 는 이 곡선의 기저시간을 나타낸다. 따라서, 그는 식 (4)를 이용하여 複合水文曲線의 기본식을 非同次偏微分方程式으로 만든 후 시간별 기저유량의 무차원증분치를 산정하였다.

본 연구에서도 지하유입량에 의한 기저유량의 증분치를 구하기 위하여 Singh<sup>(8)</sup>의 가정조건들과 그 결과식들을 인용한다. 따라서, 모든  $L$ 에 등분포적으로 1시간당 1cm의 浸透量에 의한 지하유입량이 발생되었다면, 식 (4)로 부터 기저시간  $T$ 까지  $R(x, t)$ 를 적분한 값이  $0.01fLm^2/hr$ 이 되어야 한다<sup>(8)</sup>. 그러므로, 임의  $x$ 점상에서의 최대증거치  $R_p$ 는 식 (5)와 같은 관계를 가진다.

$$R_p = \frac{\pi}{200T} \text{ (m/hr)} \quad (5)$$

여기서,  $D$  이외의 모든 매개변수들의 값이 주어진다면, 上記 관계들로부터 식 (6)과 같은 최종식을 얻을 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$\begin{aligned}
 F(D) &= KD^2 / (fL) \int_0^\infty \Delta r d\tau \\
 &= \frac{K}{100f^2} \frac{D}{L} P \\
 &= \sum_{n=1,3,\dots} \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{200\beta f D} \right)^2 P + \frac{8}{n^2 \pi^2 P}}{1 + \left( \frac{n^2 \pi^2 P}{800\beta D f} \right)^2} \\
 &= 0.01 fL \quad (6)
 \end{aligned}$$

식 (6)에서,  $\Delta r$ 는 Singh<sup>(3)</sup>의 시간별 기저유량의 무차원증분치이며,  $P$ 는  $\bar{h}/D$ ,  $\beta$ 는  $R_b/K(L/D)^2$ 인 무차원치를 각각 뜻한다.

### 3. 開水路上的 地下水 흐름 追跡

개수로내의 不定流의 漸變流에 대한 기본방정식들을 식 (7)과 식 (8)과 같은 St. Venant의 연속방정식과 운동량방정식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} - I_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \frac{Q^2}{A} = gA(S_c - S_f) - gA \frac{\partial Z}{\partial X} \quad (8)$$

여기서, 에너지 補正係數는 1로 取한 경우이며, 각 기호는 다음과 같다.

$Q$  = 하천수로상의 유량 [ $L^3T^{-1}$ ]

$A$  = 수로상의 흐름단면적 [ $L^2$ ]

$I_i (= 2q_i)$  = 하천길이 당의 측방유입량(지하수 흐름) [ $L^2T^{-1}$ ]

$t$  = 시간 [ $T$ ]

$X, Z$  = 하천수로를 따라 흐름방향으로 좌표, 0점  
에서부터의 거리 [ $L$ ]와 水深 [ $L$ ]

$S_c$  = 하천수로 바닥경사

$S_f$  = 마찰경사

$g$  = 중력가속도 [ $LT^{-2}$ ]

여기서, [ ]內의 기호들은 次元 [ $L$ : 길이,  $T$ : 시간]을 뜻한다.

上記 變數들을 圖示하면 그림 2와 같다.

문제의 해석을 간편하게 하기 위하여 이미 잘 알려져 있는 여러 가정들을 인용할 수 있겠다. 그 대표적인 가정들 가운데 하나가 하천수로의 흐름에 대한 運動波近似解<sup>(12, 16, 17)</sup>로서, 식 (8)의 운동량 방정식에서  $S_c \approx S_f$ 라고 하면  $Q$ 는 Manning (또는

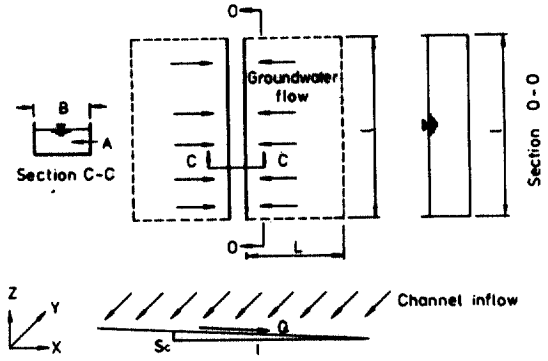


그림 2 圖示化한 흐름과 流域

Chezy) 공식에 의하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S_c^{1/2} A \quad (9)$$

여기서,  $R$ 과  $n$ 는 動水半徑 [ $L$ ]과 Manning의 粗度係數 [ $TL^{-1/3}$ ]을 각각 나타내며, 식 (9)의 관계는 Metric 單位를 가질 경우에 해당된다. 따라서, 식 (9)는 식 (10)처럼 近似化할 수 있다.

$$Q = \alpha A^m \quad (10)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $m$ 는 잘알려진 運動波媒介變數들이다.

식 (7)과 식 (10)에 대한 解를 얻기 위하여 본 연구에서는 有限差分法이 적용된다. 이를 위하여 식 (7)과 식 (10)은 식 (11)과 같이 差分型的 離散型으로 組合할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 {}_k A_j(t) &= \{ {}_k A_j(t-1) - \alpha_k [ {}_k A_j(t-1) ]^m \frac{\Delta t}{\Delta x} \} \\
 &+ \alpha_k [ {}_k A_{j-1}(t-1) ]^m \frac{\Delta t}{\Delta x} + I_i(t-1) \Delta t \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서,  $j$ 는 局所格點을 나타내며, 편의상 그림 3에서와 같이  $j=1$ 과  $2$ 로써만 주어진다. 또한  $k$ 는 總體格點  $i$ 와  $i+1$ 內의 線要素를 나타낸다. 따라서,  ${}_k Q_i(t) = {}_{k-1} Q(t)$ 의 관계를 가진다. 여기서, 主川의 측방유입량은 편의상 Harley外 2人<sup>(18)</sup>이 행한 바와 같이, 主流의 흐름방향에 대하여 直角으로 발생된다고 가정한다.

일반적으로, St. Venant 가정들은 断面急變의 현상을 나타내는 하천함류점이나 웨어(weir)上的의 흐름 및 特異한 損失水頭를 나타내는 水路의 全區

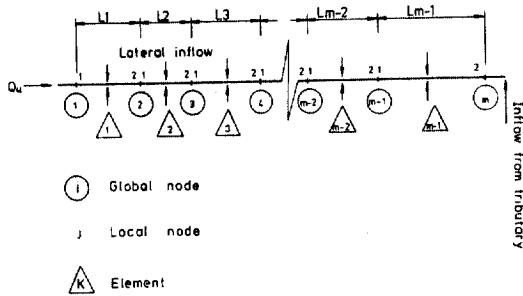


그림 3. m개의 格點을 가진 河川水路 線要素模型

間에 대하여 거의 적용될 수가 없다. 따라서, 본 연구에서는 합류점과 합류점 以內의 구간별로 식 (11)을 적용시킨다. 이때, 물론 합류점하의 하천유입량은 前區間과 支流로부터의 유량 및 측방유입량으로 이루어지며, 이는 식 (11)의 解를 얻기 위한 경계조건으로 주어진다.

식 (11)과 같은 陽性技法(explicit scheme)은 解를 위한 안정조건이 요구되며, 이를 위하여 충분한 조건은 되지 못한다 할지라도 잘 알려진 Courant 조건이 필요하다<sup>(4, 19, 20, 21)</sup>. 또한  $\Delta t$  시간 동안의 水文量은  $t$ 와  $t+\Delta t$ 에서의 水文量을 平均한 一定值로서 離散化하였다. 여기서 解를 위한 또한 조건들로서 초기조건과 운동파쇄개변수  $\alpha$ 와  $m$ 이 주어져야 한다. 초기 조건으로서 全水路에서 初期  $t=0$ 일 때의  $A_c(0)=0$ 으로 주어진다. 만약 水路를 폭이 넓은 矩形斷面으로 간주하면 식 (9)와 (10)으로부터  $\alpha$ 와  $m$ 은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{n} B^{-2/3} S_c^{1/2}, \quad m = 5/3 \quad (12)$$

#### 4. 實河川流域에 適用例

본 연구방법의 적용 예로서 선정된 유역은, 錦江水系內 支流인 報青川流域(面積: 475.5 km<sup>2</sup>)을 대상으로 하였으며, 이 유역은 國際水文開發計劃(IHP)事業의 일환으로 대표유역의 水文資料를 위하여 水文量을 관측하고 조사개발코자 현재 대표유역으로 지정된 곳이다.

본 대표유역의 현황은 그림 4와 같다.

그림 4에서 英文小文字로 표기된 小流域은 支流의 영향을 무시하고, 主流의 水路를 따라 河川의

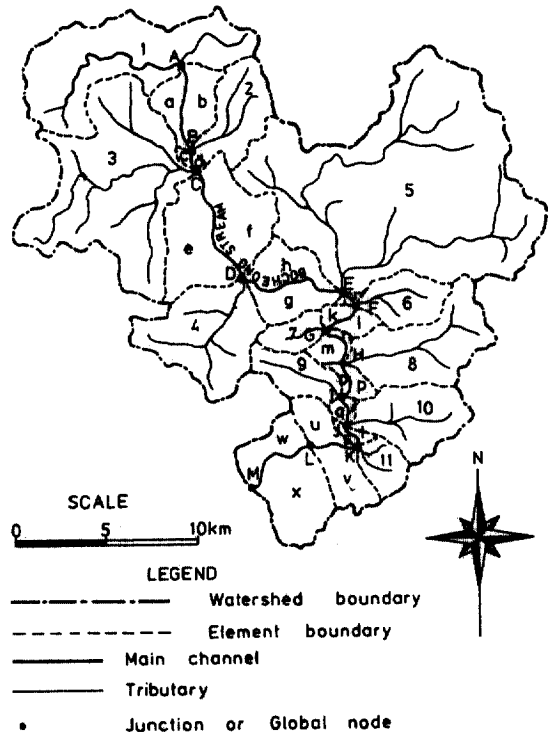


그림 4. 報青川流域 現況과 分割된 小流域

側方向으로 직접 지하수흐름이 유입된다고 가정할 곳이다.

본 연구방법론에 의한 지하수흐름 및 이의 開水路에서의 흐름추적을 결정하기 위하여는, 이에 필요한 流域內 측정된 水理 및 水文學의 特性因子들이 존재하여야 하나, 현재로서는 거의 全無한 實情이므로 IHP보고서<sup>(22)</sup>에서 가능한 한 이에 관한 정보를 얻고자 하였으며, 그렇지 못한 경우에는 지금까지 소개된 경험적인 근사치를 이용하였다.

#### 4.1 地下水흐름

2章의 媒介變數值들을 결정하기 위하여 1/50,000地形圖와 IHP보고서의 土壤圖(1983)<sup>(22)</sup>를 이용하였다. 이들에 대한 內譯은 表 1에 제시한 바와 같다.

Chorley<sup>(1)</sup>는 강우가 발생된 이후의 시간별 지표수흐름 및 지하의 깊이별 지하수가 하천에 어떻게 기여되는가를 소개한 바 있다. 그 결과로서, 실제적으로 地下地表水 가운데 基底流出에 기여하는 지하수흐름은 침투된 少量의 地下流入量에 의하여 이루어지고 있다고 밝힌 바 있다. 또한 Whipkey와 Kirkby<sup>(20)</sup>도 이와 類似한 내용을 소개한 바 있다.

表 1. 報青川 小流域別 流域現況과 媒介變數值

小流域	流域面積 $a, \text{km}^2$	主流 및 支 流의 총길이 $l, \text{km}$	帶水層幅 $L, \text{m}$	*排水可能 控 限 度 $f$	*透水係數 $K, \text{m/hr}$	토양의 種類
1	45.4	58.0	39.11	0.16	1.25	자갈이 지배적인 경작지
2	16.0	19.9	40.18	"	"	"
3	63.3	77.3	40.95	"	"	"
4	29.0	46.6	31.17	"	"	"
5	131.0	120.8	54.65	"	"	"
6	11.2	12.5	44.65	0.28	0.50	중간형의 모래
7	6.3	6.6	47.68	0.16	1.25	자갈이 지배적인 경작지
8	26.9	28.6	47.06	"	"	"
9	8.9	10.0	44.60	0.28	0.50	중간형의 모래
10	19.5	20.5	47.63	0.16	1.25	자갈이 지배적인 경작지
11	6.9	7.0	50.00	"	"	"
a, b	12.3	15.7	39.27	0.23	0.10	가는 모래
c, d	1.3	1.2	52.08	"	"	"
e, f	32.7	35.8	45.66	"	"	"
g, h	15.5	20.0	38.80	"	"	"
i, j	0.6	1.0	31.00	"	"	"
k, l	4.3	4.9	43.78	"	1.88	거친 모래
m, n	3.6	4.3	41.98	"	"	"
o, p	3.1	4.0	39.25	"	"	"
q, r	1.7	1.5	58.00	"	"	"
s, t	1.5	1.8	42.86	"	0.10	가는 모래
u, v	13.1	22.8	28.90	"	"	"
w, x	21.4	33.5	31.93	"	"	"

註) \*項은 Todd<sup>(23)</sup>의 著書를 이용하여 얻어진 것이다.

그러므로, 2章의  $\phi$ 가 뜻하는 實際 값은 비교적 적은 分數를 나타낸다고 할 수 있다. Brutsaert와 Nieber<sup>(7)</sup>는 그들의 연구에 적용한 바 있는 美國 New York 州 Finger Lakes 地域에서는 이  $\phi$ 가 기껏해야 0.1로 봐 줄 수 있으며, 이는 기저유출에 영향을 주는 대수층내의 지하수가 하천에 인접한 곳에서만 이루어지고 있음을 뜻한다고 論한 바 있다. 따

라서, 본 연구에서도 경험적 수치인  $\phi=0.1$ 을 인용하였으며, 이에 대해서는 보다 신빙성있는 자료들로부터 규명되어야 할 사항이다.

試行錯誤의으로 주어지는 매개변수치는  $P$ 와  $\beta$ 로서, 上記  $\phi=0.1$ 의 경우에 있어서의 주어진  $P$ 와  $\beta$ 들로부터 식 (6)을 이용하여 求한  $D$  값들의 內譯을 나타낸 것이 表 2와 같다. 여기서,  $P$ 와  $\beta$ 의 범

表 2. 水文特性值變化에 따른  $D$ 值

$P=0.1\sim 0.9; \beta=0.01\sim 10$

小流域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$D, m$	5.11	5.39	5.60	3.24	9.81	89.17	7.59	6.39	83.97	7.57	8.35	
小流域	a, b	c, d	e, f	g, h	i, j	k, l	m, n	o, p	q, r	s, t	u, v	w, x
$D, m$	191.15	336.20	258.42	186.60	119.12	12.64	11.62	10.16	22.18	227.70	103.53	126.37

#### 4.2 開水路上的 地下水흐름 追跡

앞節에서 획득된 지하수흐름과 3章의 방법으로 부터 主流의 水路上 임의의 점에서 지하수흐름을 추적하므로써, 각 地點別 기저유량을 산정코자 한다. 이를 위한 水理學의 特性值들 가운데 Manning의 粗度係數  $n$ 는 경험적인 근사치를 이용하였다. 이에 대해서는, 鮮于<sup>(2)</sup>가 錦江流域內 본류상의 公州 水位標地點 上流部에서는 0.030, 下流部에서는 0.028을 적용한 바 있으나, 支流에 대해서는 거의 全無한 실정이다. 그러므로, 실제 報靑州의 하천현황과 Chow의 著書<sup>(3)</sup>(pp. 112~123)을 참고로 하여 表 3에서 나타낸 바와 같이, 上流部에서는 0.050, 中流部에서는 0.028~0.035, 下流部에서는 0.026으로 가정하였다.

지하수에 의하여 主川에 유입되는 시간별 유량을 결정하기 위하여 끝으로  $P$ 와  $\beta$ 의 값이 각 유역별로 주어져야 한다. 그러나, 이들의 정확한 값을 획득한다는 것은 현실적으로 거의 불가능한 상태이며, 既往의 연구결과들<sup>(3)</sup>을 참고로 하여,  $P$ 는 중앙치인 0.5,  $\beta$ 는 각 유역별로 0.05~0.0001로 取하였다.

開水路上的 흐름추적을 위한 하천구간별 수로폭의 결정은 잘 알려진 경험적인 관계를 이용하므로

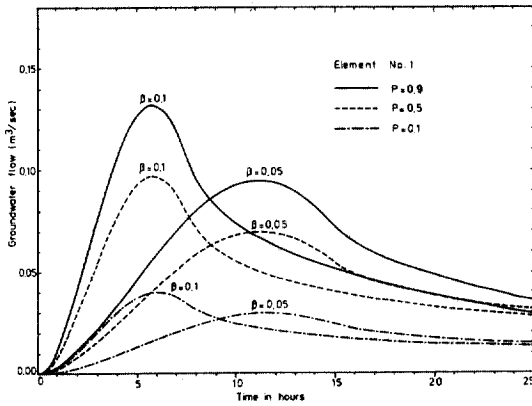


그림 5. 水文特性值 변화에 따른 시간별 기저유량 증가분 (小流域 1)

위는 表 2에서 제시한 바와 같으며, 그 예로서 小流域 1에 적용시킨 결과를 나타낸 것이 그림 5와 같다. 식 (6)의 解를 얻기 위하여 Newton-Raphson 방법을 사용하였으며, 초기치  $D=9m$ 를 입력시켰을 때 모든 경우에 대하여 반복회수 10회 이내에서 수렴하였다.

表 3. 開水路 흐름추적을 위한 報靑川 水路線要素別 媒介變數值

格點區間	格點別 距離 km	水路 平均 傾斜 S, %, $10^{-3}$	Manning의 粗度係數 $n$ , sec/m <sup>1/3</sup>	平均 水路 幅 B, m	局所格點間의 距離 Δx, m
A~A <sub>0</sub>	1.30	5.380	0.050	90	505
A <sub>0</sub> ~B	3.75	3.564	"	123	"
B~C	1.20	2.500	0.035	161	600
C~D	6.60	1.924	0.030	186	550
D~E	6.65	1.534	"	233	475
E~F	1.00	1.600	0.028	226	500
F~G	2.40	1.583	"	228	480
G~H	2.60	1.615	"	224	520
H~I	2.50	1.400	"	250	500
I~J	1.50	1.333	0.026	259	"
J~K	1.75	1.143	"	292	350
K~L	2.75	1.455	"	243	550
L~M	4.50	1.400	"	250	500

註) A<sub>0</sub>는 A點下 1.30km 地點을 뜻한다.

써 遂行되어졌다. 일반적으로 수로경사의 증가에 따라 수로폭은 兩對數方眼紙上에서 직선적 減少 현상을 나타낸다고 알려져 있다<sup>(26)</sup>. 이는 수로경사가 유속에 관계된다는 사실에 起因된 것으로서, 본 연구에서도 이를 참고로 하여 수로폭을 결정하였다. 이를 위하여 IHP보고서<sup>(22)</sup>에 수록된 主流上의 최상류부인 山城橋와 최하류부인 山桂橋 수위관측지점의 단면관측치들에 대한 평균수로폭과 表 3에서 나타낸 수로경사들을 양대수방안지상에 직선화하므로써, 수로구간별 수로평균경사에 해당되는 평균수로폭을 결정하였다.

以上的 水文 및 水理學의 매개변수치들과 지하수흐름으로부터 식 (11)에 의하여 시간별 報青川 主流上의 지하수흐름 추적을 行하였다. 여기서, 식 (11)에 대한 안정된 解를 얻기 위하여 前述한 바의 Courant조건에 해당되도록 각 요소별 局所格點間의 거리  $\Delta x$ 를 表 3에서 제시한 바와 같이 500m 內外로 하였으며, 區間數는 편의상 整數(integer)로 하는 것을 原則으로 하였다. Courant조건은 解의 안정성에 절대적인 조건은 되지 못하므로, 解에 대한 안정성을 검토하기 위하여 表 3의 각  $\Delta x$ 에 대한  $\Delta t$ 를 180 sec와 1800 sec의 두가지 경우로서 水路上의 임의의 점에서의 지하수흐름을 추적하여 보았다. 그 예로서, A點下 10.1, 26.0, 38.5 km (出口 M點)의 각 경우에 대하여 1 cm/hr의 강우침투량에 의한 기저유출증가분을 나타낸 것이 그림 6과 같다.

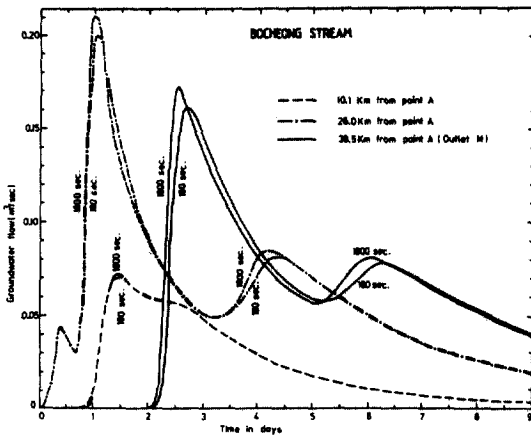


그림 6. 1cm/hr의 浸透量에 의한 報青川水路上의 地點別 追跡된 地下水흐름

## 5. 檢討分析

非被壓帶水層의 Boussinesq의 비선형방정식의 선형화 기 존이론으로부터 강우의 지하침투량에 의한 기저유출의 시간별 증가분과, 河川水路上에서의 이들에 대한 흐름추적을 St. Venant 공식에 의한 운동파이론으로부터 차분방정식을 이용하므로써 수행하였다. 이를 위한 實河川에서의 적용대상유역 으로서는 錦江水系內 支流인 報青川流域을 擇하였으며, 본 연구결과로부터 다음과 같은 사항들이 검토분석될 수 있었다.

表 1에서 제시한 바와 같이, 帶水層幅  $L$ 의 길이는  $\phi=0.1$ 의 경우에 대하여 各 小流域別로 유역면적의 크기에 무관하게 약 30~50m의 값으로 나타났으며, 이와 같은 결과로부터 이 水系가 대체로 안정되어 있다고 판단될 수 있다. 그러나, 表 2에서의 결과들에 의할 때,  $D$ 의 값은 上記  $L$ 과 透水係數  $K$ 의 값에 따라 상당한 차이를 나타내었으며,  $P$ 와  $\beta$  값들의 변화는  $D$  값에 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있었다. 이는  $D$ 가 독립변수인  $K$ 와  $f$  및  $L$ 에 의하여 주어지는 媒介變數로서, 본 연구의 지하수 기본식이 가지는 특수성이라 하겠다. 또한, 그림 5에서 제시된 바와 같이, 水文曲線에 직접적인 영향을 미치는 無次元值인  $P$ 와  $\beta$ 에 따라 基底流量 水文曲線의 첨두치의 발생시간 및 그 크기 뿐만 아니라, 減水曲線상의 기울기도 각각 현저한 樣相을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 동일한  $\beta$  값에 대하여는,  $P$  값들에 무관하게 첨두치의 발생시간은 거의 같은 현상을 나타내었다.

河川水路上에서의 흐름추적을 위한 差分方程式의 解에 대한 안정성은, 격점간의 거리  $\Delta x$ 가 약 500m의 값으로 주어졌을 때, 시간간격  $\Delta t=180$ sec와 1800 sec의 두 경우의 어느 것이든 문제가 되지 않았으며, 시간별 기저유출도 상당히 근사한 값을 나타내었다.

地下水의 河道追跡에 있어서, 主流의 시간별 유량의 상승부와 감소부의 수문곡선은 小支川과 主川側面에서 유입되는 유량에 대해서는 별 영향을 받지 않고, 큰 支川에서 유입되는 유량에 상당히 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 概念的 모형과 같이 첨두치가 하나인 單峰性의 水文曲線으로서, 報青川流域과 같은 지형학적 요소를 가진 경



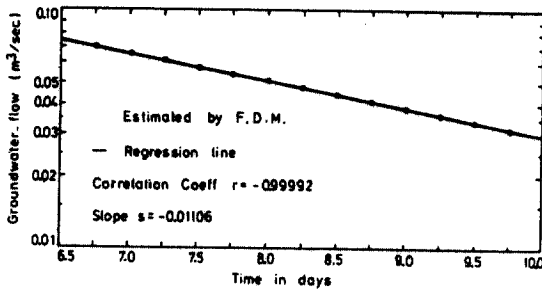


그림 7. 報靑川水路의 출구 M점에서의 主地下水減水曲線

우에 대한서의 水文解析은 無理임을 알 수 있었다.

끝으로, 본 연구결과와 타당성을 알아 보기 위하여 IHP 보고서<sup>(2)</sup>(1986, p.210)에 수록된 출구 M점의 主地下水減水曲線과 그림 6에서의 주지하수감수부의 기울기(그림 7 참조)를 비교해 본 결과, 前者와 後者の 기울기는 각각  $-0.009$ 와  $-0.011$ 로서 서로 근사한 값을 나타내었다.

또한, 그림 7에서 제시한 바와 같이, 본 연구결과로부터 획득된 主地下水減水部分은 반대수방안 지상에서 상관계수  $|r| = 0.9992$ 인 완전상관에 가까운 값이 됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 적용된 지하수흐름분석은 1cm/hr의 지하유입량에 해당되는 것이므로 만약 지속기간이 긴 지하유입량이 발생될 경우에는, 여기서의 수문곡선을 일반적인 單位圖 개념과 같이 重疊하므로써 얻을 수 있을 것이다.

## 6. 結 論

降雨에 의한 地下浸透量이 非被壓帶水層內의 地下水흐름에 기여하여, 그로부터 발생하는 시간별 基底流量 증가분을 미계측구역에서 추정할 수 있도록 지하수흐름의 線形化 모형과 St. Venant의 開水路 不定流흐름방정식을 합성하였다. 이를 위하여 1/50,000 地形圖와 土壤圖로부터 관련 媒介變數值를 결정하였으며, 이 지도들로부터 결정될 수 없는 변수들은 지금까지 알려진 경험적인 방법들을 인용하였다. 이의 實河川 적용 예로서는, IHP 대표구역들 가운데 하나인 錦江水系內 報靑川유역을 대상으로 하였으며, 그 결과 既存의 觀測值와 상당히 근사한 값을 얻을 수 있었다. 그러나, 본 연구가 선

행적으로 요구하는 水理 및 水文學的 특성인자들을 부분적으로 경험적인 수치에 의존되었다는 점에서, 앞으로 流域內 實測資料들이 획득될 수 있다면 보다 나은 결과치들을 기대할 수 있으리라 판단된다. 또한, 降雨發生 長時間 이후의 기저유량 산정에 대해서는 본 연구대상 밖이므로, 溫水期 동안에 기저유량에 절대적 영향을 미치는 損失量, 증發散 등이 고려되지 않았으나 앞으로 이의 연구가 後續적으로 이루어져야 하겠다. 그리고, 河川水路上的 흐름주점에서, 하천 합류점에서의 背水나 水路上的 堤防貯溜 效果 등은 追後 계속 연구되어야 할 課題이다.

## 감사의 말

본 연구는 韓國科學財團의 1986년도 후반기 연구과제(과제번호 862-1303-014-1) 지원비에 의하여 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 표한다. 또한, 자료수집에 적극 협력하여 주신 忠北大學의 安相鎭教授님과 全敏遇教授님께도 深甚한 謝意를 표한다.

## 參 考 文 獻

1. Chorley, R. J., "The Hillslope Hydrological Cycle," In Hillslope Hydrology(M. J. Kirkby, ed.), Wiley, New York, pp. 1-42, 1978
2. Kirkby, M. J., "Hillslope Hydrology," In Hydrological Forecasting(M. G. Anderson and T. P. Burt, eds.), Wiley, New York, pp. 37-75, 1985
3. Singh, K. P., "Some Factors Affecting Base Flow," *Water Resour. Res.*, 4(5), pp. 985-999, 1968
4. Freeze, R. A., "Role of Subsurface Flow in Generating Surface Runoff, 1, Base Flow Contributions to Channel Flow," *Water Resour. Res.*, 8(3), pp. 609-623, 1972
5. 金再韓, "水文學的 物理的 特性值의 變化에 따른 地下水 水文曲線 分析," 제29회 水工學研究發表會論文抄錄集, 韓國水文學會, pp. 123~137, 1987
6. Rorabough, M. L., "Estimating Changes in Bank Storage and Groundwater Contribution to Streamflow," World Meteorological Organization and I. A. S. H., General Assembly of Berkeley of I. U. G. G., Publ. 63, pp. 432-441, 1963

7. Brutsaert, W. and J. L. Nieber, "Reginalized Drought Flow Hydrographs from a Mature Glaciated Plateau," *Water Resour. Res.*, 13(3), pp. 637-643, 1977
8. Gallat, M. and U. Maione, "Perspective on Mathematical Methods of Flood Routing," In *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*(T. A. Ciranmi, U. Maione and J. R. Wallis, eds.), *Proc. of the Workshop at the IBM Scientific Center, Pisa*, John & Sons, Italy, pp. 169-179, 1977
9. Lighthill, M. J. and C. B. Whitham, "On Kinematic Waves, 1, Flood Movement in Long Rivers," *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 229, pp. 281-316, 1955
10. 金再韓, "Sanint-Venant 公式에 의한 開水路상의 地下水 흐름 追跡" 1987年度 學術發表會, 概要集(Ⅱ), 大韓土木學會, pp. 233-239, 1987
11. Kibler, D. F. and D. A. Woolhiser, "The Kinematic Cascade as a Hydrologic Model," *Hydrol. Paper* 39, Colo. State Univ., Fort Collins, pp. 1-27, 1970
12. Borah, D. K., S. N. Prasad and C. V. Alonso, "Kinematic Wasve Routing Incorporating Shock Fitting," *Water Resour. Res.*, 16(3), pp. 529-541, 1980
13. Polubarinova-Kochina, P. Ya, "*Theory of Groundwater Movement*," translated from Russian by R. J. M. DeWiest, Princeton University Press, Princeton, N. J., 1962
14. Brutsaert, W. and H. A. Ibrahim, "On the First and Second Linerization of the Boussinesq Equation," *Geophys. J. Roy Astron. Soc.*, 11, pp. 549-554, 1966
15. Dooge, J.C.L, "*Linear Theory of Hydrologic Systems*," U. S. Dep. Agr. Tech. Bull., 1468, 1973
16. Bras, R. L. and I. Rodriguez-Iturbe, "Rainfall Network Design for Runoff Prediction," *Water Resour. Res.*, 12(6), pp. 1197-1208, 1976
17. Desai, C. S., "*Elementary Finite Element Method*," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, pp. 211-221, 1979
18. Harley, B. M., F. E. Perkins and P. S. Eagleson, "A Modular Distributed Model of Catchment Dynamics," Rep. 133, Hydrodyn. Lab, Dep. of Civil Eng., Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 1970
19. Greco, F. and L. Panattoni, "numerical solution Methods of the St Venant Equations," In *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*(T. A. Ciriami, U. Maione and J. R. Wallis, eds.), *Proc. of the Workshop at the IBM Scientific Center, Pisa*, John & Sons, Italy, pp. 181-194, 1977
20. Lapidus, L. and G. F. Pinder, "*Numerical Solution of Partial Differential Equations in Science and Engineering*," Wiley, New York, 1982
21. 이상호, 李吉成, "Saint-Venant에 관한 有限差分法의 比較分析," 1986年度 學術發表會 概要集, 大韓土木學會, pp. 408~413, 1986
22. 建設部, 國際水文開發計劃(HIP) 代表流域研究調查報告書, 1983~1986
23. Todd D. K., "*Groundwater Hydrology*," 2nd ed., Wiley, New York, pp. 121-144, 1978
24. Whipkey, R. E. and M. J. Kirkby, "*Flow within the Soil*," In *Hillslope Hydrology*(M. J. Kirkby, ed.), Wiley, New York, pp. 121-144, 1978
25. 鮮于仲皓, "不定流解析에 의한 錦江下流部 洪水位 決定," 韓國水文學會誌, 16(2) pp. 123-129, 1983
26. Chow. V. T., "*Open-Channel Hydraulics*," McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1959
27. Ibrahim, H. A. and W. Brutsaert, Inflow Hydrographs from Large Unconfined Aquifers, *J. Irrig. Drain. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, 91(IR2), pp. 21-38, 1965
28. Gregory, K. J. and D. E. Walling, "*Drainage Basin Form and Process-A Geomorphological Approach*," Edward Arnold, London, 1983
29. Dumm, L. D., "*Drain-Spacing Formula*," *Agricultural Engineerin, ASAE*, 35, pp. 726-730, 1954

(接受 : 1988. 9. 24)