

〈技術報文〉

降雨-流出 模型化의 問題點과 方法(I)

Problems and Methods of Rainfall-Runoff Modelling

金 再 韓*

여기서 說明될 內容들은 Ciriani 外 2人(1977)²⁾에 의하여 共同編輯된 Proceedings 가운데 J.C.I. Dooge, 에 의하여 發表된 바 있는 “Problems and Methods of Rainfall-Runoff Modelling”(pp. 71~108)³⁾을 中心으로 한 것이다.

1. 水文過程의 概念的 模型

1.1. 模型의 近似化

模型은 同一性(Identification)은 없다고 하나 類似性(Similarity)은 內包하고 있으며, 原型의 모든 特性들은 아니나 一部分은 實際와 상당히 닮게 흉내내곤 한다. 따라서, 어떤 模型이 描寫되거나 討論되어질 때는 반드시 要求되는 正確度나 模型化의 目的한 바를 생각하여야 할 것이므로, 物理系의 어떤 模型에서는 簡便性과 正確性 사이에 妥協點이 存在하게 된다.

各 研究者들에게 興味の 對象이 되는 水動的 特性들은 그들이 探究하는 分野에 따라서 크게 變化될 것이다. 科學者들마다 갖는 특별한 흥미의 樣相들을 제각기 나타내기 위하여 使用된 數學的 模型들은 各 個人에 따라서 크게 다를 수도 있으며, 여러 경우에는 相反되기도 한다. 理論物理學者는 물 粒子들의 움직임을 探究하기 위하여 亞原子的(Sub-atomic) 規模로 量子力學(Quantum mechanics)의 數學的 模型을 利用한다. 또한 物理化學者는 分子規模로 그들을 研究하든지, 空氣와 물의 共有領域이나 水體를 통한 酸素의 擴散과 같은 問題들을 研究하기 위하여 簡單한 概念的 模型이나 統計學的 力學的 數學的 模型을 使用할 수도 있다. 比較的 큰 規模로서 물의 움직임을 흥미를 갖는 流體力學의 專攻學者는 物理學者나 物理化學者에 의하여 研究되고 있는 물의 상세한 構造는 無視하고, 流體移動에 對한 數學的 模型을 얻기 위하여 連續體力學(Continuum mechanics)을 適用하고 있다. 水文學者는 보다 큰 規模로서 물의 움직임을 關하여 考慮하고 있으며, 數 많은 方法들로서 問題에 接近하고 있다. 만약 水文

學者가 水理學의 觀點을 適用한다면 實際의 連續體力學을 利用하게 되나, 一般的으로 Gallati와 Maione(1977, pp. 169~179)²⁾와 Greco와 Panattoni(1977, pp. 181~194)²⁾에 의하여 提示한 바와 같은 St. Venant 方程式으로서 不定流흐름을 取扱하여 解析하고 있으며, Gallati와 Maione는 이들에 對하여 簡便化를 試圖하였다. 이와 같은 流出解析에서는 自然河川의 경우에 다음과 같은 복잡한 條件들이 內包하게 된다. (1) 크고 복잡한 地形學的 觀測과 (2) 복잡한 時系列의 계산.

上記 條件들을 處理하는 應用水文學 過程에서는 세 가지 近似方法들, 即 水理學, 概念的 模型 및 Black-box系 解析을 들 수 있으며, 이들의 各各은 問題의 복잡성, 研究의 目的 및 要求되는 正確度에 따라서 各 各마다 特殊한 有效性을 가진다. 따라서, 水文學의 過程을 解析하는데 있어서 그들이 適用되는 分野別로 論하여질 때, 連續體假定이 물의 상세한 構造를 無視한다는 事實 때문에 이 理論이 훌륭한 學術分野가 될 수 없거나 有用한 結果들을 성취시킬 수 없는 것은 아니다. 이와 마찬가지로, 水文學에서의 概念的 模型이나 Black-box 理論의 使用은 어떤 問題를 近似化하는데 훌륭한 方法이 될 수 있을 뿐만 아니라, 特別한 範疇의 問題에 對하여 效果의 經濟적으로 有用한 結果들을 주게 된다.

1.2. 概念的 模型의 性質

降雨-流出 問題에 對한 概念的 模型의 近似方法은 連續體力學에 根據를 둔 水理學的 方法과 Black-box系 解析에 依한 單位(流量)圖의 理論 사이에 仲介的(Intermediate)인 性質을 가진 것이다. 그러나 여기서 概念的이란 말은 水文學의 要素들을 物理적으로 相關시키기 위하여 比較적 적은 數의 要素들로서 公式化한 模型을 單純하게 나타내는데 使用된다. 이와 같은 制限性은 分類나 討論의 便利性을 위하여 주어진다. 降雨-流出 模型들 가운데 가장 널리 使用되고 있는 概念的 要素들은 線形貯水池와 線形水路이다. 開水路의 不定

* 忠南大學校 工科大學 土木工學科

流의 경우에서 一連의 線形貯水池나 水路들의 各 流量이 長時間後에는 減衰部들이 함께 結合될 것이며, 上記概念的 要素들에 의하여 各 減衰部와 時間的 移行過程들을 分離시키거나 集中시키는 것을 나타낼 수 있다 (Dooge, 1959). 그러나 이와 같은 作業은 實際적으로 쉬운 일은 아니라고 하겠다. 왜냐하면, 數值解析에 의한 分離法이 指數函數의 경우에 滿足할 만한 結果를 줄 수 없기 때문이다 (Lanczos, 1957).

考案될 수 있는 概念的 模型數는 限이 없다. 이와 같은 理由 때문에 最近 水文學 研究에서의 큰 缺點은 주어진 狀態에서 가장 理想的인 模型選擇을 위한 基準을 開發하거나 客觀的인 模型들의 比較방법을 考案할 勞力도 들이지 않고 概念的인 模型만 急増시키는데 있다고 하겠다. 따라서, 여기서 強調하고자 하는 것은 一般的인 流域應答模型을 記述하는데 있다가 보다 오히려 概念的인 直接豪雨應答模型의 性質을 論하고, 各 模型을 서로 比較하는데 있다.

어떤 概念的 模型들은 St. Venant 方程式을 너무 簡單하게 解釋한 것이 있고, 또한 어떤 模型들은 Black-box 理論에 의하여 系應答의 數學的 近似를 나타낸 것이 있다. Dooge(1977, pp. 71~108)²⁾에 의하여 概念的 模型에 使用된 二 媒介變數(Two-parameter) 模型 가운데 하나인 擴散類推(Diffusion analogy)는 0이라고 할 정도로 작은 Froude 數의 경우에 對한 St. Venant 方程式의 線形化에 該當되며, FRUSA(Flood Routing Using Simplified Algorithms) 프로그램 (Mugnai and Pattoni, 1977, pp. 331~349)³⁾ 內의 線形擴散方法에 包含된다. 이와 같은 特別한 方法은 連續體力學에 根據를 둔 數學的 模型과 集中系(Lumped system)로서 流域의 降雨과 流出過程을 解析한 概念的 模型 사이에 遷移性質을 나타낸다고 말할 수 있겠다. 이와 같은 事實은 側面流入量을 가진 一連의 同等線形貯水池群의 概念的 模型이 Black-box 理論에 의한 系應答를 入力와 出力의 二 多項式들의 比에 의하여 近似化할 수 있다는 假定과 一致한다.

入力인 降雨과 該當出力인 流出을 確(決)定的 또는 推計學的 時系列로서 看做하여야 할 것인지에 對하여 아직까지 明確하게 規定되어진 바는 없다. 媒介變數를 決定짓는 方法이나 命名法이 二 경우에 對하여 서로 다르다 할지라도, 使用된 概念的 模型은 같은 경우가 많다 (Dooge, 1972). 그러므로, 推計學的 時系列을 나타내기 위하여 使用된 ARMA 模型(Box and Jenkins, 1970)은 降雨-流出 研究에서 確定的 概念模型으로 널리 使用된 側面流入量을 가진 一連의 均等線形貯水池群의 模型과 一致한다. 여기서는 主로 確定的 入力에

作用하는 概念的 模型에 對하여 說明이 局限될 것이다.

1.3. 線形성과 時不變

1.1.의 세 가지 近似方法 가운데 降雨-流出 解析에 어떠한 것이 使用되든지 간에 理論이나 計算이 線形과 時不變으로 이루어진다면 아주 簡便하게 處理될 수 있다. 水理學에 根據를 둔 近似方法은 一組의 偏微分方程式으로 이루어지고, 이들이 非線形보다는 線形으로, 또한 係數들이 可變的인 것보다 常數인 것이 훨씬 더 解析하기가 쉽다. 係數가 常數인 線形方程式은 線形時不變系와 一致하며, 이와 같은 方程式은 地表나 地下水表流出의 解析을 위하여 使用되고 있다. 概念的 模型을 使用함에 있어서 時不變의 假定은 時系列 解析을 위하여 要求되는 媒介變數를 단 하나의 값으로 規定지게 되며, 線形的 假定으로 非線形的의 경우보다 쉽게 媒介變數를 最適化하게 된다. Black-box 系 解析에서 線形과 時不變의 假定은 入力에 對한 系를 入力와 衝擊應答으로부터 廻旋積分(Convolution integral)에 의하여 表現할 수 있다. 이와 같은 衝擊應答 또는 核(Kernel)은 그 決定方法에 있어서 非線形이 要求하는 一連의 核들에 比하여 線形論은 단 하나의 核을 要求한다는 點에서 處理하기가 쉬운 일이라 하겠다. 그러므로, 水文系에서 線形과 時不變性的 假定이 採擇될 수 있는 경우를 위하여 이들의 理論을 詳細하게 論하여 준다는 것은 상당한 意味를 가진다.

入力 X 에 對한 系의 應答이 各 要素 x_i 로부터 式(1)과 같이 結合된다면, 이 系를 線型(Linear)이라 일컫는다.

$$X = \sum_{i=1}^n c_i x_i \dots\dots\dots(1)$$

또한, 出力 Y 역시 各 x_i 에 該當되는 出力要素 y_i 에 의하여 式(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \sum_{i=1}^n c_i y_i \dots\dots\dots(2)$$

따라서, 系의 意味에서 線形性이란 代數學에서 취급하고 있는 式(3)의 直線의 (Linear) 關係와는 구별되어야 하겠으며, 式(3)은 線型성을 갖지 않는다.

$$Y = a + bX \dots\dots\dots(3)$$

또한 線形系의 重疊(Superposition)의 性質과 式(4)와 같은 回歸方程式의 線型性과는 구별되어야 한다.

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n \dots\dots\dots(4)$$

왜냐하면, 式(4)와 같은 線形性은 變數 X 보다는 오히려 係數 a 들의 線形性이기 때문이다 (Clarke, 1973).

物理系의 어떤 模型들은 一定媒介變數系에 局限하는 경우가 있다. 即, 系의 媒介變數들이 時間에 따라 不變한다는 性質을 뜻한다. 이를 時不變系(Time-invar-

ient system)와 자리移動不變系(shift-invariant system)라 일컫는다. 따라서, 만약 入力要素 $x_i(t)$ 가 出力要素 $y_i(t)$ 를 發生시키면, 時間이 어떤 點 t 를 基準으로 t_0 만큼 移動하여 入力이 作用한다면 出力도 이와 똑같은 時間만큼 移動된 狀態에서 發生된다. 即, 入力 $x_i(t \pm t_0)$ 는 出力 $y_i(t \pm t_0)$ 를 일으킨다. 確定的 過程의 時不變은 推計學的 過程에서의 엄격한 定常性和 一致한다. 이와 같은 現象은 系の 應答이 時間原點과는 無關하며, 다만 時間이 經過하여 作用된 入力の 形態에만 依存케 된다는 것을 뜻한다.

以上の 理論으로부터 計算過程上 流域系는 線形과 非線形으로 大別될 수 있으며, 이들을 各各 時不變과 時變으로 다시 나눌 수 있다.

1.4. 總應答과 成分應答

降雨과 流出關係를 解析함에 있어서 물의 循環過程들을 함께 處理하여 水文過程의 各 要素들을 一括한다면 (Lumped), 流域系의 操作은 상당히 簡便하게 된다. 一般적으로 降雨과 流出의 成分過程은 地表流出(Q_s), 中間流出(Q_i)과 地下水流出(Q_b)로 區別될 수 있으나, 이들을 正確하게 구별하기란 쉽지 않다. 따라서, 通常 直接流出(Q_s)과 基底流出(Q_b)로 大別하여 취급하고 있는 實情이다. 이에 對한 流域應答을 나타낸 것이 그림 1과 같다.

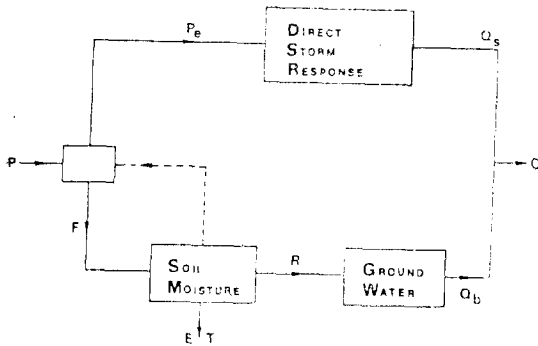


그림 1. 簡便化한 流域模型

그림 1의 模型은 直接豪雨應答과 基底流出 사이를 判別한 것이고, 또한 飽和帶의 地下水와 非飽和帶의 土壤水의 舉動을 區別한 것이다. 이와 같은 簡便化한 流域模型을 다음과 같은 세 가지 成分으로 크게 나눌 수 있다. (1) 直接豪雨應答成分(超過雨量 P_e 를 Q_s 로 變換); (2) 地下水應答成分(地下에 注入된 量 R 을 Q_b 로 變換); (3) 蒸發과 蒸散(E, T)에 의한 土壤水의 減少와 土壤水의 狀態과 浸透量(F)에 미치는 效果를 考慮하여야 하는 非飽和帶의 成分. 降雨-流出 過程의 大部分의 概念的 模型들은 그림 1과 같은 一般의인 型

을 가진다. 그러나 이들은 여러 成分들이 模擬(Simulation)되어지는 方法과 복잡성이 서로 다른 現象을 나타낸다. 따라서, 降雨-流出 過程을 위한 模型에서 비록 이 過程이 不明確하게 處理되어진다 할지라도, 이 세 成分들이 다 함께 考慮되어야 할 것이다. 最近 Hino와 Hasebe(1984)의 研究는 이의 좋은 例라고 하겠다.

이들에 對한 降雨과 流出關係를 線形模型에 의하여 處理하는 것이 바람직할 경우가 있다. 一般적으로 土壤의 含水未洽量이 없을 때에는 感知할 수 있는 程度로 土壤含水가 地下水에 注入(Recharge)만 일어나는 始初의 效果가 있다고 看做된다. 그러나 이와 같은 始初의 效果는 實際적으로 非線形이기 때문에, 總流域應答을 위한 線形模型으로는 이 特性을 나타낼 수가 없다. 따라서, 降雨-流出 模型化의 初期試圖에서 線形化에 支障을 招來하지 않는 直接豪雨應答에 關心이 모아

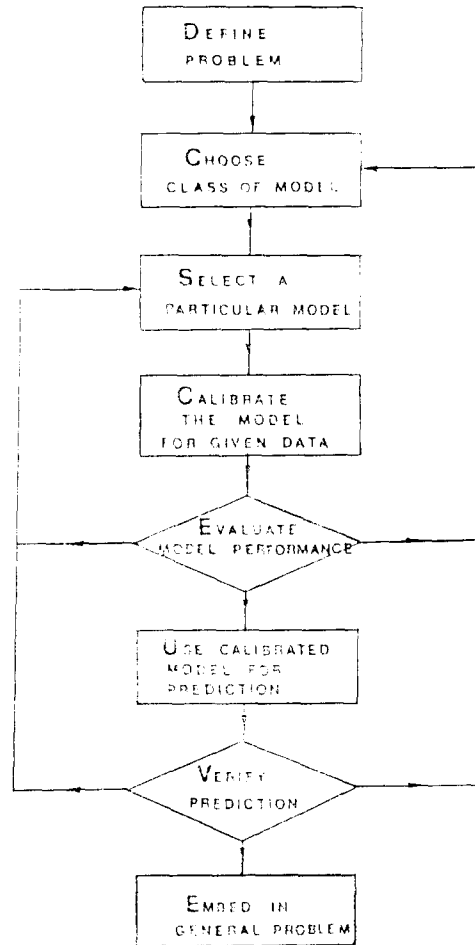


그림 2. 選擇, 檢定 및 數學的 模型의 使用

졌다. 이는 당연한 것이라 하겠다. 여기서는 당분간 線形論의 解析으로 直接豪雨應答에 對하여 論할 것이 며, 地下水應答과 土壤含水量應答의 線形論은 追後에 簡單히 論하여질 것이다.

直接豪雨應答을 위한 各種 模型의 參考文獻은 풍부 하나, 實際問題에 水文學者가 接하게 될 때에 어떤 模型을 選擇하여야 하는 指針은 거의 없는 것 같다. 그러므로, 流出事象에 對한 가장 좋은 模型은 各 研究者의 研究目的에 따라 依存되고 있다. 模型의 選擇과 檢定 및 降雨-流出 過程의 數學的 模型의 合理的인 使用方法論은 그림 2와 같은 過程을 따를 수 있겠다.

그림 2의 마지막 段階는 選擇된 模型을 檢정한 後에 이 模型이 더욱 더 一般的인 模型으로 될 수 있음을 알려 주고 있다. 다시 말해서 지금까지 實用化되고 있는 成分模型들을 高度의 操作水準에 의하여 總流域 應答模型으로 具體化시킬 수 있음을 提示하고 있으며, 이 模型을 복잡한 水資源系의 運營이나 設計를 위하여 意圖하고자 한 政策決定模型에 適用시키므로써 이의 實用化를 이룩할 수 있을 것이다. 그러므로, 만약 推定된 結果들의 正確性을 目的한 바의 簡便한 一般的 模型들에 의하여 保障하지도 않고, 正確한 豫測을 하기 위하여 상당히 복잡한 模型만을 開發하고자 하는 誤謬를 우리 學者들은 범하지 말아야 할 것이다.

參 考 文 獻

1) Box, G.E.P. and G.M. Jenkins; *Time Series*

Analysis: Forecasting and Control, San Francisco, Holden-Day Inc. 1970.

- 2) *Ciriani, T.A., U. Maione and J.R. Wallis (editors); *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*, Proceedings of the Workshop at the IBM Scientific Center, Pisa, Italy, John Wiley & Sons, 1977.
- 3) Clarke, R.T.; "Mathematical Models in Hydrology," Irrigation and Drainage Paper No.19, FAO, Rome Dooge, J.C.I.(1959), "A General Theory of the Unit Hydrograph," *Journal of Geophysical Research*, 64(2), pp.241~256. 1973.
- 4) Dooge, J.C.I.; "Mathematical Models of Hydrologic Systems," *International Symposium on Modelling Techniques in Water Recourses Systems, Proc.*, Vol.1, pp.171~189. Department of the Environmental, Ottawa. 1972.
- 5) 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.
- 9) Lanczos, C.; *Applied Analysis*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J. 1957.

→ 101 페이지에서 계속
 상현성으로 어떤 민족에 있어서도 주의깊게 관찰되어 왔으며 또한 기록에 남기고 있으나 우리의 조상들과 같이 조직적인 관측과 보고 및 기록을 남긴 나라는 찾아 볼 수 없다. 이 시대의 것으로는 실로 잘 정비되어 있다고 볼 수 있을 뿐만 아니라 단지 피력만을 중점적으로 다루지 않고 모든 상황을 기록에 남겼다는 사실은 과학적인 사고가 철저히 있었기 때문이라고 여겨진다.

참 고 문 헌

- 1) 李丙燾 譯註; 「三國史記」乙酉文化社. 1977.
- 2) 「국역 증보문헌비고」; 세종대왕기념사업회. 1979.
- 3) 「朝鮮王朝實錄」; 國史編纂委員會. 1957.
- 4) 「譯註 高麗史」; 東亞大 古典研究室. 1982.
- 5) 田村尊之助; 「李朝鮮氣象學史研究」三島科學史研究所. 1983.