<論說>

推計水文學의 研究動向과 展望(Ⅰ)

—Evolution and Prospect of Stochastic Hydrology—

李 舜 鐸*
Soontak Lee

1. 序 言

지진이나 돌풍등의 地球物理學的 諸現象과 같이 水文學的 事象들은 많은 非定規性과 不確定性을 수반하는 현상이라 생각된다. 이것은 우리가 관찰하는 水文學的 現象의 과정에 대한 지식이 부족한 때문이다.

水文學이라는 學問은 자연적인 호기심을 만족시키기 위한 서술적인 質的단계에서 실제의 必要에 부응하기 위하여 보다 量的인 研究方法으로 발전되었다. 初期에는 水文學의 知識이란 것이 그 이해에 있어서 觀測이거나 理論이거나 간에 거의 기초가 없었기 때문에 단순한 추측에 불과하였다. 그러나 이때부터 초보적인 觀測이 시작하여 점차로 과학적인 測定과 實驗이 수반되었으며 現代化時代(Chow, 1964a)에 와서는 더욱 개선이 이루어지게 되었다. 따라서 現代水文學은 이때부터 시작되었으며 마침내 量的水文學이 今世紀初에 와서 시작되게 되었다. 그리고 이 量的水文學의 발달을 위하여 적합한 水文資料를 얻고 이를 理論的으로 해석하는 것이 필요하게 되었다.

水文學的 理論과 水文現象사이에는 어떤 구별이 있어야 하는 것으로서 前者는 단순히 後者의 인위적인 해석에 지나지 않는다. 理論的으로는 水文學的 過程은 結定論的으로 설명될 수 있지만 실제에 있어서 이것은 水文現象의 非定規性 및 不確定性에 의하여 나타나는 바와같이 매우 非結定論的이다. 이 理論에서와 같이 水文學的過程의 非結定論的 성질은 推計學的으로 설명될 수 있으며 따라서 소위 推計水文學(Stohchastic hydrology)이라는 분야가 생겨나게 되었다.

형식상으로 推計水文學의 실체는 두개의 주요요소로 구성되어 있는데 그 하나는 結定論的인 것이고 다른 하나는 確率論的 또는 無作爲的인 것이다(Clow, 1971). 비록 確率論的 또는 無作爲的이라는 用語와 推計學的이라는 用語가 흔히 同意語로 사용되지만 그 해석을 명백히 하기 위하여 이들의 차이를 구별하는 것은 매우 중요하다. 確率論的 또는 無作爲的이란 말은 주어진 集合으로 부터 그 구성요소들을 완전히 우연배열하는 것을 지칭한다. 換言하면, 이것은 獨立 및 無相關의 無作爲變數에 대한 것으로서 이로부터 在來的인 確率理論이 처음 발전되었다. 특히 그 개념을 강조하기 위하여 이것을 순수 無作爲(Pure-random) 또는 순수確率論的(pure-probabiistic)이라 할 수 있다. 한편 推計學的이란 말은 無作爲要素를 결합시키는 한 關係, 變數, 또는 過程에 대하여 쓰이는 것으로(Van Nostrand, 1968) 이 역시 結定論的 성질을 포함하기 때문에 非순수無作爲(nonpure-random) 또는 非순수確率論的(monpure-probabilistic)으로 설명될 수 있다.

推計學的 過程에 있어서 結定論的 成分은 흔히 長期變動成分(trend)으로 생각되며 그 반면 確率論的 成分은 雜音(noise)으로 생각된다. 원래 推計學的(Stochastic)이란 말은 "목표를 겨누다"의 뜻을 가진 희랍어 "Stochastikos"에서 유래된 것이다(Chow, 1971). 따라서 推計學的 過程이란 것은 목표를 겨누는데 있어서의 오차를 나타내는 確率的 雜音으로서의 목표와 같이 結定論的 長期變動成分을 겨누는 것으로서 표현될 수 있다. 水文學的 理論의 어떤 경험적인 立證도 水文學的 過程의 測定과 이로부터 理論的모델에 의한 그 過程의 再現을 포함하고 있다. 그러나 測定에 있어서의 不正確性과 實世界에 있어서의 정확한 再現이 불가능하기 때문에 비록 작을지라도 항상 雜音이 있기 마련이다. 그러므로 진실한 結定論的인 상태란 이상적인 것이며, 그렇지 않으면 실제의 목적을 위하여 근사적으로 생각될 수 밖에 없다. 실제로 結定論的 過程이란

* 本 學會 理事·嶺南大工大 敎授·工學博士

雜音을 零이라고 가정하는 경우의 특별 推計學的 경우라고 해석할 수 있으며, 이와 비슷한 원리로 推計學的 過程에 있어서의 結定論的 成分은 存在하지 않는다고 가정할 수 있다. 따라서 그 결과는 역시 推計學的 過程의 특별한 경우인 確率論的(순수確率論的 또는 순수 無作爲) 過程이 된다. 그래서 結定論的 및 確率論的 過程은 推計學的 過程의 두 극단적인 경우가 된다.

推計水文學이란 일반적으로 水文現象의 無作爲的 성질을 고려하므로서 水文學的 過程에 관하여 理論的으로 해석하는 것으로, 그 발달과정은 進化的으로 나타낼 수 있다. 따라서 다음과 같은 몇가지 연구방법을 통하여 그를 인식할 수 있게 될 것이다.

2. 經驗的 接近方法

많은 다른 科學分野와 같이 推計水文學도 經驗的인 방법으로 시작되었으며, 그 初期에 있어서는 無作爲의 개념도 概算法으로 설명되었다(Chow, 1972). 放水路의 設計에 있어서, 例컨데 25年의 기록치 가운데 제일 큰 尖頭洪水値에다 安全係數 2～4를 곱한 값을 흔히 最適設計洪水로 취하였다. 그러나 곧 이러한 設計基準이 전혀 적합치 않다는 것을 발견하게 되었다. 그 例로서 美國의 한 河川에서 1935年에 경험한 洪水의 크기가 과거 40年間에 발생한 洪水의 크기보다 몇 10배 이상이 된 것을 발견한바 있으며 우리나라나 다른 나라에서도 이러한 경우를 흔히 볼 수 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위한 推計水文學的 성질에 대한 지식 없이는 이 安全係數는 실제로 無視의 係數가 되는 것이다.

安全係數(gactor-of-safety) 개념의 非適合必性 때문에 水文技術者들은 보다 낳은 해석방법들을 찾기 시작하였으며, 이러한 觀點에서 1880年에서 부터 1890年까지 Herschel 및 Freeman에 의하여 최초로 流量의 變動性을 조사하기 위한 방법으로서 流量持續曲線(flow-duration curve)이 사용되었다(Foster, 1934). 그러나 이 방법은 水文學的 變動性을 나타내기 위한 經驗的인 방법일뿐 理論的인 근거가 희박한 방법으로서, 항상 日, 月 및 季節的인 周期性의 結定論的 成分을 포함하는全持續時系列을 채택하기 때문에 엄격한 의미에서 순수無作爲變量을 취급하는 것으로 생각되는 水文學的 頻度曲線에 관한 방법이 아니다. 그러나, 이 流量持續曲線은 確率的 硏究方法으로 향한 한 진보적인 단계로 생각된다.

3. 確率的 接近方法

Fuller(1914)에 따르면 流出의 硏究에 있어서 確率的 방법의 사용은 1896年에 G.W.Rafter에 의하여 그에게 제안되었다고 한다. 그러나 그 당시 비교적 장기간의 기록치가 부족하였던 관계로 얼마후 까지 그러한 방법은 계속되지 못하였다.

Gauss의 誤差法則이 그 기초적 단순성과 有意性 때문에 水文學硏究에 최초로 응용된 確率理論이었으며, 이 법칙의 正規分布에 기초를 둔 洪水의 연구가 가장 일찌기 이루어졌다. 이러한 연구들로서 Horton(1914)은 처음으로 이 법칙의 水文學的 應用을 논의하였고, Hazen(1930, 1914)은 처음으로 1913年에 正規確率紙 프롯팅방법을 설명하였으며, Fuller(1914)는 美國에 있어서의 洪水에 관한 統計學的 방법에 대해서 최초로 포괄적인 연구를 수행하였다.

그러나 Hazen(1914)은 곧 年洪水流量의 對數値가 流量値 그대로 보다 더욱 Gauss 法則에 일치한다는 것을 발견하였다. 이것은 年洪水의 頻度分布가 대개 歪曲分布이고 그리고 Galton法則에 의하여 정의되는 對數正規分布와 같은 非對稱分布가 이러한 자료에 더욱 적합하기 때문에 사실임을 알 수 있다.

이 對數正規分布는 더욱 인기가 있어 왔으며 지금도 널리 사용되고 있다. 그리고 역시 다른 여러 歪曲分布들도 Foster(1948)에 의하여 논의된 바와 같이 水文學的 頻度解析에 있어서 뒤에 많이 소개되었다. 이들 가운데 Gumbel(1941)은 洪水頻度分析에 있어서 Fisher-Tippet(1928)의 極値理論의 적용을 소개하였는 바, 이 非對稱極値分布는 그 단순성 때문에 널리 사용되고 있으며 歪度가 일정할 때 단지 두개의 統計變數를 가질 뿐이다.

최근에 와서 美國水資源評議會는(U.S.Water Resources Council, 1967) 洪水頻度解析의 기본방법으로서 非對稱 Log-Pearson Type Ⅲ 分布를 사용할 것을 권장하였다. 이 방법은 전에 사용된 일이 없기 때문에 관련기관에 頻度解析의 방법을 제공하여 주었으나 몇가지 결점을 지니고 있다. 예를 들면 이 방법은 統計變數를 계산하기 위하여 모멘트法을 사용하고 있는데, 이에 의하여 큰모멘트를 갖는 자료에 있어서의 오차를 과장하기 쉽고 또한 圖式的인 프롯팅을 필요로 하지 않기 때문에 어떤 특이현상을 쉽게 찾을 수 없다. 더구나 이 방법은 불규칙적이고 단기간의 자료에 대해서 더욱 不正確한 歪度係數의 계산을 필요로 하고 있다.

4. Markov의 接近方法

理論的인 確率分布를 사용하는 것은 본질적으로 推計學的 過程의 確率的成分에 대한 모델을 제공하기 위한 것으로서, 年洪水 및 이에 유사한 水文極値는 獨立

事象으로 취급할 수 있으며 따라서 순수無作爲變量으로 생각할 수 있다. 그리고 水文資料의 全持續時系列은 日, 週, 月, 季節 또는 平均年觀測値로서 이루어져 있으며 周期的이던 또는 직선적이던 간에 연속적으로 從屬的인 長期變動成分을 가진다.

일반적으로 觀測時系列의 連續値간의 從屬性은 순수無作爲變量의 確率分布로서 완전히 模型化할 수 없기 때문에 累進平均値法이 사용되게 되었다. Hoyt等 (1936)은 美國의 몇몇 선정 流域에 대한 年 및 10年 累進平均降水量을 구하는 圖表를 제공하였는데, 이 圖式的인 방법이 실제로 推計學的 水文過程에 대한 移動平均(moving-averag, MA) 모델의 사용을 가져왔다.

즉, 이 모델은 다음과 같이 표시된다.

$$X_t = b_0\varepsilon_t + b_1\varepsilon_{t-1} + \cdots + b_m\varepsilon_{t-m} = \sum_{j=0}^{m} b_j\varepsilon_{t-j} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

여기서 X_t는 推計學的 過程의 時間t에서의 推計學的 變量; ε는 零의 平均値 및 有限의 變動率을 갖는 순수無作爲變量; $b_0, b_1, \cdots, b_m$는 $\sum b_j^2$이 보통 1에 수렴하는 加重係數; m은 移動平均의 범위이다.

한편 그 周期性을 확인하기 위하여 調和 또는 스펙트럼分析(harmonic or spectral analysis) 방법이 水文氣象資料에 사용되었다. 즉, Chow 및 Kareliotis (1970)는 推計學的 流域시스템에 있어서 降水, 蒸發散 및 流量成分에 있어서의 周期的 從屬性을 결정하기 위하여 이 분석방법을 적용한 바 있다. 推計學的 水文過程에 대한 소위 Sum-of-Harmonic(SH) 모델의 일반형은 다음과 같이 표시된다.

$$X_t = \overline{X} + \sum_{j=1}^{m} (A_j\cos 2\pi f_{jt} + B_j\sin 2\pi f_{jt}) + \varepsilon_t \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

여기서 X_t는 推計學的 過程의 時間t에서의 推計學的 變量; $\overline{X}$는 X_t의 平均値; A_j 및 B_j는 Fourier係數 또는 진폭; f는 기본頻度數; $2\pi f_{jt}$는 $j=1, 2, \cdots, m$일 때의 周期; m은 모델에 포함된 싸이클의 총수; ε_t는 순수無作爲成分이다.

처음 소련의 數學者 A.A.Markov(1856—1922)는 일련의 試行에서 한 事象의 발생은 바로 이것에 先行하는 試行의 발생에 좌우된다는 개념을 소개하였으며, 이 개념에 따라서 推計學的 過程에 대한 단순 Markov 모델을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_t = a_1X_{t-1} + \varepsilon_t \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

여기서 X_t는 時間t에서의 推計學的 變量; X_{t-1}은 時間$t-1$에서의 推計學的 變量; a_1은 Markov係數; ε_t는 零의 平均値를 갖는 標準無作爲變量이다. 이 모델은 단순히 임의 時間에서의 한 變量의 값이 이것에 先行하는 값에다 한 確率的成分을 합한 값에 좌우된다는 것을 말하는 것으로, 처음 Brittan(1961)에 의하여 年流量에 적용되었다.

실제로 이 단순 Markov모델은 다음과 같이 표시되는 더욱 일반적인 線型回歸(AR) 모델의 특수한 경우이다.

$$X_t = \varepsilon_t + a_1X_{t-1} + \cdots + a_mX_{t-m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

또는

$$X_t = \sum_{j=1}^{m} a_jX_{t-j} + \varepsilon_t \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

여기서 X_t는 時間t에 있어서의 推計學的 變量; a_j는 $j=1, 2, \cdots, m$에서의 自己回歸係數; m은 모델의 次數; ε_t는 確率的 또는 無作爲 變量이다. 이때 定常時系列의 경우 自己回歸係數는 系列相關係數(Serial Correlation Coefficient)와 동일하다고 생각된다. 따라서 단순 Markov모델은 1次 AR모델이 된다. Julian(1960) 및 Yevjevich(1971)는 각각 AR모델이 SH모델 및 MA모델에 그 근거를 갖고 있으며 그로부터 유도될 수 있음을 보여 준바 있다.

Markov 개념을 확장하기 위하여서는 MA,SH 및 AR모델들도 Markov의 接近方法으로 역시 분류할 수 있으며, 이들은 과거 20여년간 推計學的 水文資料의 分析에 널리 사용되었다(Kisiel,1969; Fiering 및 Jackson, 1971; Chow, 1978). 이들 모델은 모두 無作爲成分을 포함하고 있는 것으로서, 주어진 水文資料로부터 일단 모델이 설정되면 이 無作爲成分은 Monte Carlo 방법으로 模擬發生시킬 수 있다. 그러므로 초기조건이 주어지면 모델은 擬似無作爲(pseudo-random) 또는 "Synthetic" 水文變量을 模擬發生하는데 사용될 수 있다. 이 방법은 최근 Harvard 水資源프로그램에서 이용된 후 지금까지 많은 연구 및 응용이 있었고 우리나라의 河川 및 水文氣象資料에 대해서도 연구 및 응용이 된 바 있는 방법으로서 (李舜鐸, 1975 및 1979) "Synthetic Hydrology" (Julian, 1960) 또는 "Operational Hydrology" (Fiering, 1966)라고 불리워졌다. 그러나 이 "Operational Hydrology"란 말은 뒤에 世界氣象機構(WMO)에 의하여 실제로 應用水文學에 상당하는 의미로 바뀌어 졌으며, 또한 推計水文學이란 말이 Synthetic hydrology 대신에 사전에 제안되었다는 것은 주목할만 하다(1964b). 따라서 현재로서는 推計水文學의 급속한 발전으로 인하여 이 Synthetic hydrology는 광범위한 推計水文學의 한 分科로서 생각되어야 한다.