流域流出模型과 媒介變數의 變化特性

李舜鐸*, 池洪基*, 安勝燮**

1. 序論

河川流域에서 발생하는 降雨-流出現象은 일반적으로 經驗的 模型, Black Box模型 및 模擬模型 등으로 해석하고 있다. 특히 Black Box模型은 降雨로 부터 流出이 발생하는 物理的인 과정을 구체적으로 취급하지 않고 入力과 出力으로부터 應答函數를 유도하여 降雨로부터 流出量을 변환시키는 單位流量圖 模型, CLS(Constrain Linear System) 模型 등이 개발되어 왔다. 한편 Simulation 模型은 物理的 過程이 시간에 따라서 변하는 상호작용을 나타내는 數學的 模型이며, 貯留構造의 크기와 貯留構造間의 수송률은 媒介變數로 정의된다. 이와 같은 模擬模型의 대표적인 예는 SWM (Stanford Watershed Model) 模型, HEC-1(HEC-1 Flood Hydrograph Package) 模型 및 SSARR(Streamflow Synthesis and Rese-
rvoir Regulation) 模型 등이 있다.

본 연구에서는 美陸軍工兵團 社會事業部(U.S. Army Corps of Engineers, Civil Works Division)에서 개발하여 Rockwood(1964)에 의해 수정 보완된 SSARR模型을 이용하여 洛東江流域의 流出시스템에 적용하여 流域流出解析을 실시하고, 이 模型에서 사용되는 媒介變數의 變化特性을 검토함으로써 河川流域의 流出解析에 필요한 최적 媒介變數를 결정하고자 하였다.

2. 流域流出模型의 基本理論

본 硏究에서는 河川流域의 洪水流出模型을 檢討하기 위하여 현재 洛東江流域의 洪水流出 硏究에서 그 적용성이 입증된 바 있는 Simulation 模型인 SSARR模型을 선정하였다.

2.1 流出模型의 基本理論

SSARR模型은 流域에서 발생하는 降雨로 부터 洪水追跡을 위한 特殊目的模型으로서 비교적 큰 流域에 대한 洪水流出와 貯水池 運營을 위한 Simulation模型로서, 機能上 模型을 분류하면 流域

* 영남대학교 공과대학 교수
** 영남대학교 대학원 박사과정

(Watershed)模型, 河道流出(Streamflow)模型 및 貯水池 運營操作(Reservoir regulation)模型로 구분된다. 流域의 流出은 地表面流出(Surface flow), 地表下流出(Subsurface flow) 및 基底流出(Baseflow)로 구분되며, 이러한 流出의 계산은 流域의 특성을 고려하여 계산된다. 본 模型의 수행을 위하여 필요한 模型의 媒介變數중 土壤濕潤指數-流出率(SMI-ROP : Soil moisture index-Runoff percent), 降雨強度-蒸發散 減少係數(RI-KE : Rainfall intensity-Factor for reducing evapotranspiration on rainy days), 基底流出浸透指數-基底流出率(BII-BFP : Baseflow infiltration index- Baseflow percentage) 및 地表面流出率-地表下流出率(S-SS : Surfce flow-Subsurface flow)의 관계가 명확하게 추정되어야 한다.

한편 본 模型에서 사용하고 있는 追跡技法은 貯留方程式의 連續方程式에 기초를 두고있으며, 流域이나 河道上에서 上·下流의 流入量(I_1, I_2), 貯留量(S_1, S_2) 및 流出量(O_1, O_2) 사이의 관계는 다음 식과 같다.

$$\frac{1}{2}(I_1+I_2)\cdot t - \frac{1}{2}(O_1+O_2)\cdot t = S_2 - S_1 \qquad (2.1)$$

流入量 I_t를微分方程式의 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$I_t = O_t + dS/dt \qquad (2.2)$$

또한 貯留量이 流出量의 函數인 自然湖水에서 T_s는 貯留量과 流出量과의 비례상수를 나타내므로 $S = T_s \cdot O$이며, 이를 시간 t에 대하여 微分形으로 표시하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$I_t = O_t + T_s \cdot (dO/dt) \qquad (2.3)$$

따라서 追跡계산에 있어서 洪水末期의 流出量(Q_2)은 平均流入量(I_m), 初期流出量(O_1) 및 貯留時間(T_s)에 의해서 다음 식과 같이 정의된다.

$$Q_2 = \frac{I_m - O_1}{T_s + 0.5\cdot t} \cdot t + O_1 \qquad (2.4)$$

이상과 같은 과정에 의해서 초기의 流出量과 유입량이 주어지면 末期의 流出量이 계산되며, SSARR模型에 대한 개념적인 과정을 도식적으로 나타내면 Fig. 2.1과 같다.

2.2 流出시스템의 構成

洪水流出계산을 위한 시스템의 構成時에 小流域과 河道區間은 流出시스템의 중요한 요소로서 流域의 地形特性, 河道特性 및 洪水管理 등을 고려하여 구성하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 洪水流出 Simulation을 위하여 洛東江流域을 대상으로 하였으며, 小流域과 河道區間의 구분은 本流 및 支流區間의 地形特性과 水文觀測施設 등을 기준으로 하여 24개 小

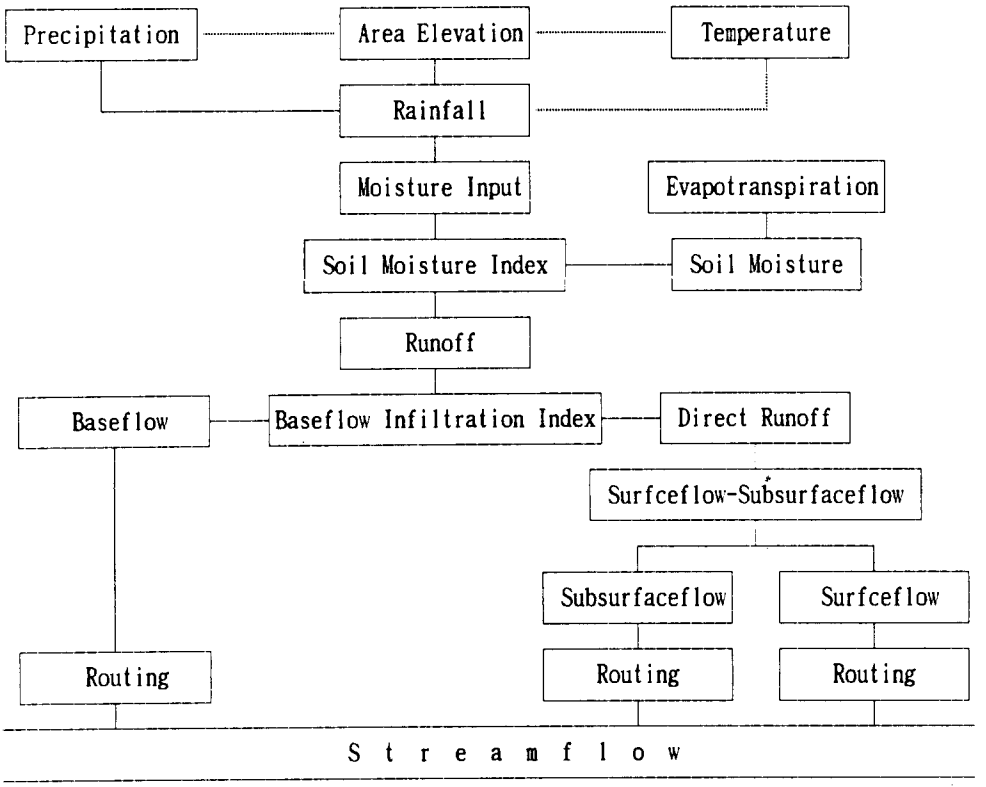

Fig. 2.1 Conceptual Diagram of SSARR Model

流域(支流流域 7개, 댐流域 6개, 河道流域 11개)과 14개 河道區間으로 분할 하였다(Fig. 2.2).

3. 模型媒介變數의 推定

SSARR 模型에서 流域流出解析에 필요한 模型媒介變數의 變化特性을 분석하기 위하여 流域流出模型 및 河道流出模型을 流域 및 河道 시스템별로 구분하여 模型의 媒介變數 變化特性 分析과 媒介變數 適合性 檢定을 실시하였다.

流域流出 및 河道流出 해석에 필요한 媒介變數는 모두 24개이나 降雪量해석에 이용되는 媒介變數를 제외하면 총 16개이며, 이를 流域流出 模型과 河道流出 模型으로 나누어 분류하면 Table 3.1과 같다. 이 중에서 流出解析에 중요한 영향을 미치는 模型 媒介變數는 SMI-ROP, BII-BFP, RGS-RS, KE-RI관계 곡선 및 河道區間의 貯留特性과 流出特性 媒介變數(N 및 KTS)가 있다.

3.1 流域流出 媒介變數

流域流出 媒介變數의 추정을 위한 과정은 다음과 같다.

(1) 流域平均降雨量(Basin Weighted Average Precipitation)

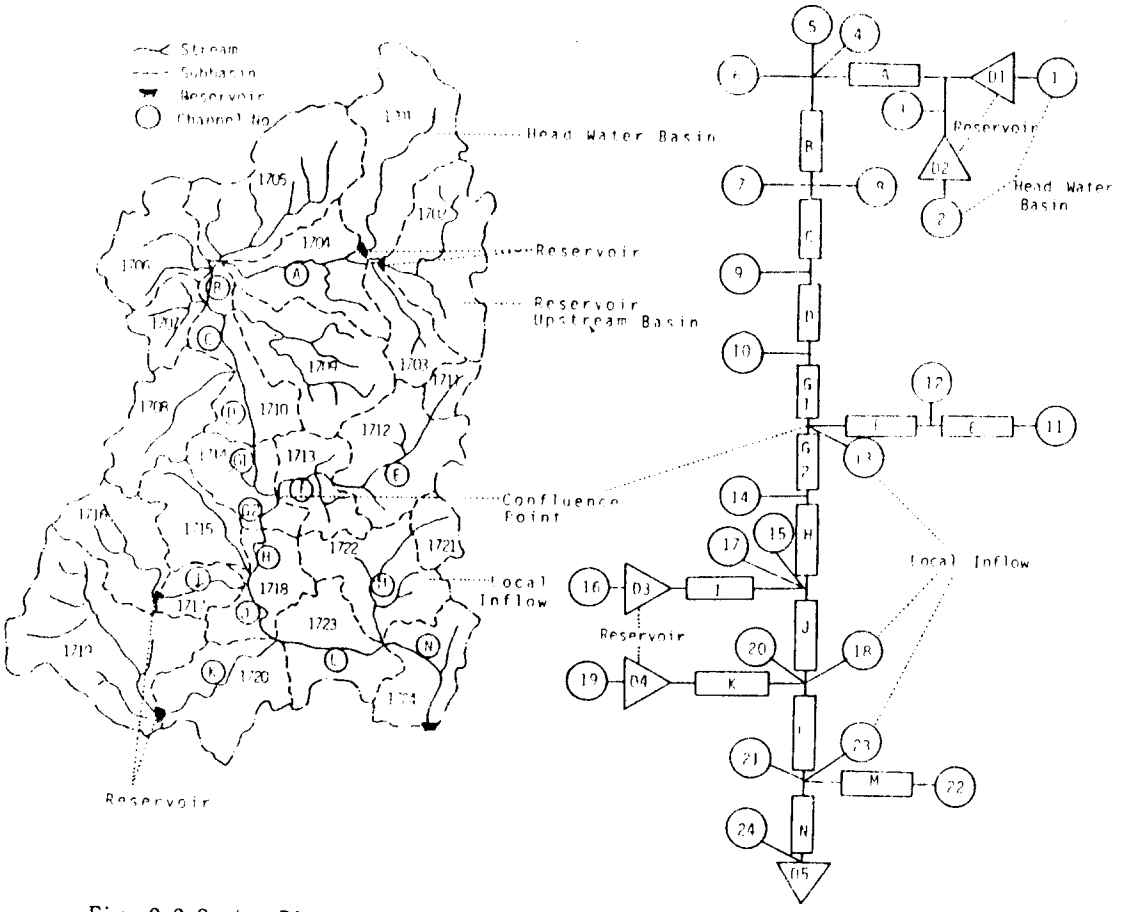

Fig. 2.2 System Diagram for the Floodflow Simulation System in Nakdong River System

Table 3.1 Parameters of SSARR Model

Model	Parameters
Watershed	W, SMI, ROP, BII, BFP, RGS, RS, KE, RI, ETI, BIIMAX, TSBII, KSS, N, KTS, Phase No.
Streamflow	N, KTS, Phase No.

SSAR模型에 의한 流域流出 해석을 위하여 降雨의 입력으로부터 流域平均降雨量을 산정하는 방법은 Thiessen방법에 의한 面積平均降雨量 산정원리와 같으며, 그 식은 식(3.1)과 같다.

$$PP_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (PP_{it} * W_i) \qquad (3.1)$$

(2) 流域의 蒸發散指數(Evapotranspiration Index)

洪水時 流域流出解析 시스템을 구성하고 있는 각 小流域別 蒸發散量을 산정하기 위하여 본 연구에서는 月別 實際蒸發散量(ETI_i)을 이용하였다.

(3) SMI-ROP

流出水文曲線에 가장 큰 영향을 미치는 媒介變數들 중의 하나인 SMI-ROP의 관계는 流出 容積뿐만 아니라 流出의 시간적 분포를 표시하는 流出水文曲線의 모양을 좌우하게 되며, 媒介變數는 다음과 같다.

豪雨의 발생으로 인한 t시각의 土壤水分指數(SMI)는 (t-1)시각의 SMI에 浸透損失量(總降雨量-總流出量)을 합한 값으로 계산하며 식(3.2)와 같이 정의할 수 있다.

$$SMI_2 = SMI_1 + (WP - RGP) - (PH * KE * ETI / 24) \quad (3.2)$$

여기서, RGP=ROP*MI

(4) 基底流出浸透指數(Baseflow Infiltration Index(BII))

豪雨發生으로 인한 基底流出浸透指數(BII)의 결정을 위한 기본식은 다음 식(3.3)와 같다.

$$BII_2 = BII_1 + (24 * RG - BII_1) \cdot \frac{PH}{BIITS + PH/2} \quad (3.3)$$

$$TBF = BFP*RG \quad (3.4)$$

(5) 地表 및 地表下流出(Surface and Subsurface Flow Components)

洪水時 總流出에서 基底流出을 제외한 流出成分은 地表水 流出成分과 地表下 流出成分을 각각 분리시킬 수 있으며, 河道流出에 직접적인 영향을 미치는 洪水流出量은 入力降雨 중에서 基底流出成分을 제외한 量으로 정의하며 식(3.5)와 같다.

$$RGS = RG - TBF = RG(1.0 - BFP) \quad (3.5)$$

또한 地表面流出(Surface component input rate : RS)과 地表下流出(Total input rate to surface and subsurface component : RGS)의 관계 설정을 위하여 最少地表流出成分은 總流出量의 10%로 하며, RS의 계산은 식(3.6)과 같다.

$$RS = [0.1 + 0.2 \cdot (RGS/KSS)] \cdot RGS \quad (3.6)$$

3.2 河道流出 媒介變數

自然河道에서의 洪水追跡은 基本追跡方程式에 의하며, 流出量의 계산에 필요한 每追跡當 貯留時間 T_s를 결정하는 방법으로는 경험식에 의한 방법과 貯留時間(T_s)-流出量(Q)관계 수치표를 사용

하는 방법이 있다. 경험식에 의해서 T_s를 계산할 경우는 추적변수인 n과 KTS값을 유사한 河道區間에서 실측자료로부터 결정한 값을 초기치로 택하여 시행착오적으로 最適値를 얻게 된다.

河道流出媒介變數는 크게 3가지로서 流出追跡 回數(Phase no.), 追跡變數 n 및 每 追跡當 貯留時間 T_s으로 나눌 수 있으며, 河道追跡의 기본식은 식(3.7)과 같다.

$$T_S = KTS/Q^n \tag{3.7}$$

4. 模型媒介變數의 變化特性 分析

4.1 模型 媒介變數의 檢定方法

본 연구에서는 추정된 模型 媒介變數의 적합성을 검정하기 위하여 媒介變數의 변화에 따른 敏感度分析을 실시하였다. 분석에 사용된 방법은 模型의 效用度(Model efficient ; ME), 絶對誤差의 平均(Mean square error ; MSE), 相對誤差의 平均을 나타내는 偏寄率(Bias) 및 體積誤差의 白分率(Volume error ; VER) 등을 분석하였다. 또한 豫測된 洪水水文曲線의 尖頭値 부분에 대한 적합성을 검정하기 위하여 觀測 및 豫測 水文曲線에 대한 尖頭流量差의 백분율(Peak-flow error ; QER)을 계산하여 模型 媒介變數의 最適値를 결정하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$ME = 1 - \frac{\Sigma (Q_{obs} - Q_{est})}{\Sigma (Q_{obs} - Q_{mobs})} \tag{4.1}$$

$$MSE = \left[\frac{\Sigma (Q_{obs} - Q_{est})^2}{n} \right]^{1/2} \tag{4.2}$$

$$Bias = \frac{\Sigma (Q_{obs} - Q_{est})}{n} \tag{4.3}$$

$$VER = \frac{|\Sigma Q_{obs} - \Sigma Q_{est}|}{\Sigma Q_{obs}} \times 100 \tag{4.4}$$

$$QER = \left[\frac{|Q_{Pobs} - Q_{Pest}|}{Q_{Pobs}} \right] \times 100 \tag{4.5}$$

여기서, n은 資料의 수, Q_{obs}는 觀測流量, Q_{est}는 豫測流量이며, Q_{mobs}는 觀測流量의 平均値이다.

4.2 模型 媒介變數의 變化特性分析

SSARR模型의 媒介變數가 流出에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 洛東江流域의 주요 小流域에 대한 流入水文曲線을 추정하였으며, 이때 流域 및 河道流出 媒介變數의 변화에 따른 流出水文曲線의 變化特性을 검토하였다. 模型 媒介變數의 變化率은 -15~+15%로 하여 각 5%씩 변화

시키면서 그 변화 특성을 분석하였다. 그 결과 模型 媒介變數의 변화에 따라서 流出水文曲線의 형태와 尖頭量이 많은 변화가 있는 것으로 분석되었다.

4.3 模型媒介變數의 最適化

流域流出解析을 위한 SSARR模型의 媒介變數 變化特性에 따른 敏感度 분석을 실시하여 流域의 流出解析時에 필요한 최적 模型媒介變數를 결정하였으며, 그 결과 Fig. 4.1과 같다.

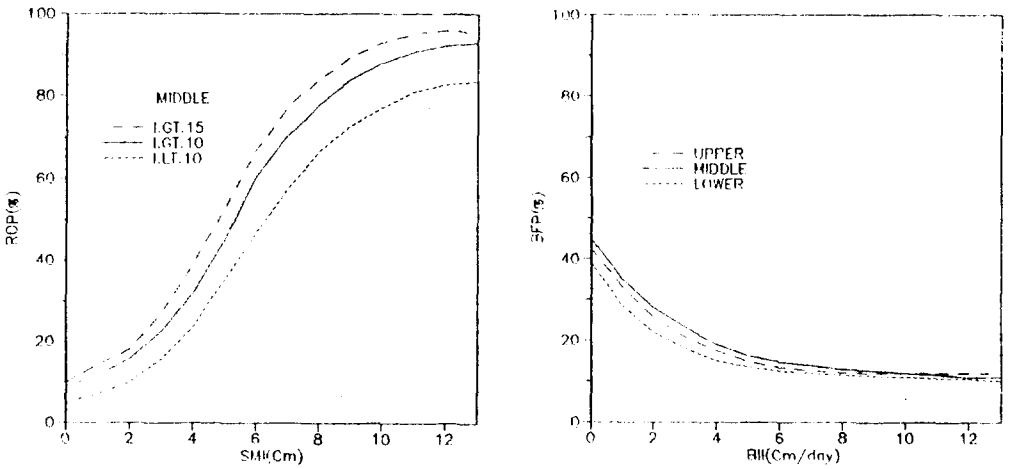

Fig. 4.1 SSARR Model parameter

5. 結論

본 연구에서는 河川流域의 洪水流出模型을 檢討하기 위하여 현재 洛東江流域의 洪水流出 硏究에서 그 적용성이 입증된 바 있는 SSARR模型을 선정하여 模型의 수행에 필요한 模型媒介變數의 變化特性을 분석하고 이로부터 模型媒介變數의 최적화를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 流域流出 媒介變數(SMI-ROP, BII-BFP, RGS-RS, KE-RI)의 분석결과 SMI-ROP, RGS-RS 및 BII-BFP는 流出水文曲線의 형태와 尖頭發生時刻에 민감한 영향을 나타내고 있었으나, KE-RI관계는 다른 流域特性 媒介變數와는 달리 流出量에 큰 영향을 미치지는 않았으나 KE의 변화율이 커질수록 SMI의 값은 감소되며, 이로 인해 流出容積은 증가하는 것으로 분석되었다.

2. 河道流出 媒介變數(Phase no., KTS, n)의 분석결과 河道流出媒介變數들은 流域流出媒介變數와는 달리 尖頭發生時刻에 민감한 영향이 있는 것으로 분석되었다.

이상의 分析 결과에서 나타난 바와 같이 洛東江流域의 洪水流出 解析時에는 본 硏究에서 제시된 最適 流出媒介變數를 이용하는 것이 媒介變數의 敏感度分析 결과 가장 좋은 것으로 나타났다.

그러나 水文觀測 施設의 擴充과 精密 計測된 水文資料의 蒐集이 이루어 진다면 본 硏究에서 제안된 媒介變數를 初期値로 사용할 경우 合理的인 流出解析이 될 수 있을것으로 思料된다. 또한 他 流域에 본 模型을 적용하고자 할 경우에는 여기서 제시한 模型 媒介變數의 補正方法에 따라서 流域特性에 적합한 媒介變數를 결정하는 것이 最適 流出解析方法이 될 수 있을 것으로 思料된다.

參考文獻

1) U.S. Army Engineer Division, North Pacific, Program Description and User Manual for SSARR, Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation(1972).

2) Lee, Soontak, Flood Forecasting System Model in Nakdong River Basin, Korea, Preceedings of Southeast Asia Regional Symposium on Hydrological Aspectes of Nonstructural Flood Mitigation Measures, Hangzhou, China(1989).

3) 李舜鐸, 池洪基, 安勝燮, 河川流域의 洪水流出Simulation, 大韓土木學會(1991).

4) 李舜鐸, 南宣祐, 池洪基, 河川流出豫測을 위한 降雨-流出모델, 韓國水文學會誌, 第19圈 第 4號(1986).

5) 韓國水資源公社, 洛東江水系 多目的댐 連繫運營方案 硏究(1·2次) 報告書(1989~90)∝

6) 韓國水資源公社, 洛東江水系 多目的댐 連繫運營活用에 따른 綜合 물管理시스템 開發 硏究 報告書(1992).

7) 建設部, 洛東江 洪水豫警報 및 低水管理 프로그램개발 報告書, 洪水部門(1987).