

最適化 技法에 의한 貯留函數 流出 模型의 自動補正

Automatic Calibration of Storage-Function Rainfall-Runoff Model Using an Optimization Technique

沈淳輔* · 金善久** · 高錫九***

Shim, Soon Bo · Kim, Sun Koo · Ko, Seok Ku

Abstract

For the real-time control of a multi-purpose reservoir in case of a storm, it is absolutely necessary to forecast accurate flood inflows through a good rainfall-runoff model by calibrating the parameters with the on-line rainfall and water level data transmitted by the telemetering systems. To calibrate the parameters of a runoff model, the trial and error method of manual calibration has been adopted from the subjective view point of a model user. The object of this study is to develop a automatic calibration method using an optimization technique. The pattern-search algorithm was applied as an optimization technique because of the stability of the solution under various conditions. The object function was selected as the sum of the squares of differences between observed and fitted ordinates of the hydrograph.

Two historical flood events were applied to verify the developed technique for the automatic calibration of the parameters of the storage-function rainfall-runoff model which has been used for the flood control of the Soyanggang multi-purpose reservoir by the Korea Water Resources Corporation. The developed method was verified to be much more suitable than the manual method in flood forecasting and real-time reservoir controlling because it saves calibration time and efforts in addition to the better flood forecasting capability.

요 지

다목적댐 유역에서의 濠雨발생지 저수지 實時間 운영을 위해서는 Telemeter 설비를 통해 온라인으로 전송된 降雨 및 流入量(水位) 관측자료를 이용하여 降雨-流出 模型의 媒介變數를 신속하게 補正하고 精確한 유입량을 예측하여야 한다. 지금까지는 유출모형의 매개변수 보정을 모형 운영자의 주관적인 판단 아래 試行錯誤에 의한 手動補正 방법을 사용하여 왔으나 最適化 기법을 이용하여 강우-유출모형의 매개변수를 자동으로 보정할 수 있는 방법을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다. 最適化 기법으로는 다양한 조건하에서도 해의 안정성이 우수한 Pattern-Search법을 선정하였으며 목적함수로는 모형에 의해 산정된 유출량과 관측 유출량과의 편차의 제곱에 대한 누계치를 최소화 하는 것으로 하였다.

* 정희원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 한국수자원공사 댐건설사업 본부장

*** 정희원 · 한국수자원공사 수자원연구소, 공학박사

본 연구를 위하여 개발한 최적화 기법을 현재 韓國水資源公社에서 소양강 다목적댐의 실시간 홍수 조절에 사용하고 있는 貯留函數 유출모형의 매개변수를 과거의 洪水事象을 사용하여 자동으로 보정 하는데 적용하였다. 적용결과 시행착오에 의한 수동보정 방법보다 시간 및 노력면에서 보다 효율적일 뿐만 아니라 홍수예측 기능도 보다 우수하여 저수지의 실시간 홍수예측 및 홍수조절에 알맞는 것으로 나타났다.

1. 서 론

컴퓨터의 출현으로 많은 강우-유출모형(rainfall-runoff model)이 개발되어 유출유역의 水文學의 내부작용 과정을 數式化함으로써 水文學事象을 보다 사실에 가깝도록 模擬하여 하천 홍수 유하량을 신속하고 정확하게 예측할 수 있는 기능이 증대되어 왔다. 그러나 이러한 강우-유출모형 중에서도 적용하고자 하는 유역 조건에 맞는 적절한 모형을 선택해야 하는 어려움이 있을 뿐 아니라 선택된 모형을 유역특성과 水文學事象에 알맞게 檢定(model identification)해야 하는 일이 무엇보다도 중요하다.

특히 다목적댐의 홍수조절 효과를 높이기 위해서는 댐으로 유입하는 홍수량을 신속하고 정확하게 예측하여야 하며 우수한 유출 모형으로부터 모형사용에 따른 각종 매개변수를 洪水事象이나 유역조건에 알맞게 補正하는 일이다. 일반적으로 어떠한 모형이라 할지라도 실제 시스템을 오차 없이 모의할 수는 없으며 하나의 사상에 대해 근접한 결과를 갖는 모형도 다른 조건의 사상에 대해 큰 오차를 유발할 수도 있으므로 대부분의 모형은 모의시험이나 예측을 위하여 사용 전의 模型補正(model calibration)의 과정을 거쳐야 한다. 특히 水文學現象과 관련있는 유출모형에 있어서는 다양한 기상 및 지형학적 특성과 수문 관측 오차를 배제할 수 없기 때문에 유출모형의 질에 못지 않게 중요한 것이 모형의 보정이라 할 수 있다.

현재 한국 수자원 공사에서 개발하여 사용하고 있는 貯留函數 유출모형의 매개변수는 각 소유역별로 유역의 지형적 특성을 고려하여 경험식에 의해 산정되었으며(한국수자원공사, 1985), 댐상류 유량자료와 강우자료의 부족 및 부정확성으로 인해 과거 홍수자료에 의한 모형검정은 많은 문제점이 있었다. 그래서 지금까지는 다목적댐 상류에서의 호우시 모

형에 의해 산정된 댐유입량과 Telemeter(T/M) 설비에 의해 實時間으로 관측된 댐유입량을 토대로 모형 운영자의 주관적인 판단하에 매개변수를 조정하는 실정이었다.

본 연구에서는 이러한 모형의 실시간 보정 과정을 개선하기 위해 컴퓨터의 발달로 최근 그 사용이 증가하고 있는 最適化 技法의 하나인 Pattern-Search(P-S)법(Hooke 및 Jeeves, 1961)을 한국 수자원 공사에서 다목적댐 홍수예측을 위하여 사용하고 있는 저류함수 유출 모형에 적용하여 매개변수를 자동으로 보정할 수 있는 방안을 제시하였다. 최적화 기법에 의한 自動補正을 위하여 合成流出(synthetic runoff) 자료를 이용하여 敏感度 分析에 의한 최적화 모형의 결정변수 선정 및 최적화 모형의 檢證(model verification)을 실시하였으며 실시간 내의 모형보정을 위하여 적절한 수렴조건을 제시하였다.

2. 貯留函數 流出模型의 最適化

2.1 貯留函數法의 基本

강우로 인한 유출 계산을 위해 수학 모형의 하나인 저류 함수법은 1961년 일본의 Kimura(本村俊晃, 1961)가 제안하였으며, 사용의 간편성과 유출해석의 비선형성을 고려할 수 있는 장점이 있어 주로 일본에서 널리 사용되어 왔다. 우리나라에서는 1960년대 한강 홍수 통제소에서 홍수 유출 해석 컴퓨터 프로그램 개발시 적용된 이래 다목적댐을 관리하고 있는 한국수자원 공사에서도 저류함수법을 홍수 유출 해석에 주로 이용하고 있다.

저류 함수법을 이용한 유역 유출량 산정식의 기본 개념은 유출량과 저류량과의 관계를 나타내는 저류 방정식과 流域 또는 河道의 물 收支를 나타내는 연속 방정식으로 나타낼 수 있다(南宮, 1985; 尹, 1986).

$$S_e = KQ_e^p \quad (1)$$

$$dS_e/dt = frA - Q_e \quad ; \text{유역} \quad (2)$$

$$dS_e/dt = \sum_{i=1}^n f_i I_i - Q_e \quad ; \text{하도} \quad (3)$$

여기서

S_e : 유역 또는 하도에서의 實貯留량(m^3)

Q_e : 遲滯時間이 고려된 직접 유출량(m^3/s)

r : 유역 평균 강우 강도(m/s)

A : 유역 면적(m^2)

K, P : 유역(또는 하도) 특성에 따른 貯留常數 (무차원)

f : 유역의 평균 유출계수(무차원)

f_i : 하도의 평균 유입계수

I_i : 支流域 또는 상류하도로부터의 일정 구간 河道로의 유입량(m^3/s)

n : 支流域의 수

상기 식들에서 시간 t 에서 지체시간 T_e 을 고려한 유역 또는 하도의 유출구에서의 유출량 $Q_e(t)$ 는 지체하기 이전의 유출량 $Q(t)$ 에 대해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_e(t) = Q(t + T_e) \quad (4)$$

식 (1)에서 저류상수인 K 와 P 는 과거 홍수관측 자료로부터 산정할 수 있으며, 유역 평균 강우량 r 를 알면 식 (2)에 따라 유역으로부터의 유출량을 산정할 수 있고, 유역 유출량을 다시 하도유입량으로 이용하여 식 (3)에 따라 하도의 유출량을 산정할 수 있다.

유역의 유출을 산정하기 위하여는 유효 강우량이 유역의 유출율에 따라 계산되어야 하며 강우의 초기 단계에서의 유출율은 1차 유출율로써 f_1 으로 일정하다고 가정하고 누계 강우량이 포화유량 R_{sa} 보다 큰 기간 동안의 유출율을 포화 유출율이라고 하며 보통 1로 가정한다(尹龍男, 1986).

2.2 最適化 模型의 構成

저류함수 유출모형의 이상적인 적용은 각 소유역 출구 및 하도에서의 유량 관측자료와 기타 수문자료를 가지고 解析의 方法에 의한 모형을 검정하고 실제 유출량 예측시 약간의 보정 절차를 거쳐 매개변수를 조정하는 방법이라 할 수 있다. 그러나

현재 우리나라에서 주로 사용되고 있는 모형은 매개변수 검정에 필요한 하천 유하량 관측자료의 부족으로 일본 利根川에서 유도된 경험식에 의해 각 소유역별로 매개변수가 산정되었으며(한국 수자원공사, 1985) 모형의 실제 사용시 매개변수의 보정은 다음식에 의해 전체 소유역을 같은 비율벡터 $\Lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 로 조정함으로써 이루어진다.

$$\Theta_c = \Theta_o \cdot \Lambda^T \quad (5)$$

여기서, $\Theta_c^T = (K, P, T_e, f, R_{sa}, K', P', T_e')$ 는 유역과 水文 특성에 따라 보정하고자 하는 매개변수의 최종 보정치를 나타내며 Θ_o 는 관측이나 경험에 의해 초기값으로 채택된 매개변수 벡터를 나타낸다. 변수중 K 와 P 는 유역의 저류상수이며, K' 와 P' 는 하도의 저류상수이고 T_e 과 T_e' 는 유역 및 하도의 지체시간을 나타내며, f 와 R_{sa} 는 평균 유출계수와 포화유량을 나타낸다.

저류함수 유출모형은 주로 각 소유역별 유출량을 산정할 수 있는 부프로그램과 하도추적을 위한 부프로그램 및 관측 지점에서의 관측 유하량과 계산 유하량과의 편차가 최소인 매개변수를 산정하는 최적화 부프로그램 등으로 구성되어 있다. 최적화 모형과 저류함수 유출모형의 접속은 유출모형의 주프로그램에서 최적화 부프로그램을 호출하면 최적화 모형에서는 후술할 制約條件에 따라 목적함수 값이 최적인 매개변수 값을 산정하며, 수렴조건 범위 여부를 결정하여 수렴할 때까지 계산한다. 유출해석과 최적 매개변수 산정은 상류지점에서 하류지점으로 순차적으로 호출하여 전체유역의 유출량을 결정하게 된다.

3. 最適化 技法에 의한 模型의 自動補正

降雨事象에 대한 유출의 모의분석이나 홍수 유출량의 예측을 위하여 이용되는 강우-유출 모형의 사용에 있어서는 모형의 매개변수를 水文 및 기상과 지형학적 특성에 알맞도록 보정하여야 한다. 모형의 보정 방법에는 시행착오에 의한 手動補正(manual calibration)과 최적화 기법에 의한 自動補正(auto-calibration) 방법이 있다(Sorooshian 및 Gupta, 1983). 수동보정 방법은 모형 수행에 의한 컴퓨터 출력을 특정한 방법(주로 수문곡선의 시간적

비교)에 의해 관측치와 비교하여 직감적으로 매개 변수를 조정하며, 이를 위해서는 모형 및 유역의 특성을 완전히 이해하고 모형보정에 대한 숙련된 경험과 감각을 갖춘 수문 기술자가 필요하다. 자동 보정 방법은 최적화 기법을 이용하여 특정한 산정 기준을 최대 또는 최소화하여 모형의 매개변수를 결정하는 방법이다.

유출모형의 매개변수 자동보정에 보편적으로 많이 사용되는 최적화 기법은 직접 탐색법으로 Pattern-Search(P-S) 방법(Hooke 및 Jeeves, 1961), Simplex 방법(Nelder 및 Mead, 1965) 및 Rotating Directions 방법(Rosenbrock, 1960) 등이 여기에 속한다. 直接 探索法은 알고리즘 자체가 효율성 면에서 Gradient-Based 방법보다 떨어지나 후자는 대부분의 유출모형 방정식의 微分係數를 매개변수에 대해 일정한 형태로 나타내기가 어렵기 때문에 거의 사용되지 않고 있다(Gupta 및 Sorooshian, 1985).

Gupta 및 Sorooshian(1985)은 Gradient-Based 방법의 하나인 Newton-Raphson 방법과 Simplex 방법을 6개의 매개변수를 갖는 유출모형에 적용한 결과 직접 탐색법이 컴퓨터 실행시간 면에서 더 효율적이며, 특히 매개변수의 수가 많은 모형일수록 그 효율성이 증대함을 언급했다. Hendrickson 등(1988)은 SMA-NWSRFS(Soil Moisture Accounting-National Weather Service River Forecasting System) 모형에 Newton 방법과 P-S 방법을 적용한 결과 P-S 방법이 모형의 여러가지 조건하에서도 안정된 해를 구할 수 있으며, Newton 방법은 컴퓨터 실행시간이 짧은 반면 목적함수의 應答面(response surface)의 상태에 따라 나쁜 결과를 얻을 수 있어 해의 안정성이 떨어짐을 지적했다. 따라서 본 연구에서는 매개변수를 자동 보정할 수 있는 최적화 기법으로 P-S 방법을 선정하여 프로그램화 한 뒤 저류함수 유출모형의 본 프로그램에 접속시켰다.

3.1 目的函數의 定義

최적화 기법의 적용을 위해서는 최적화 算定基準인 목적함수가 정의되어야 하며 강우-유출모형의 일반적인 목적함수는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$f(E) = f[Q - R(I, \Theta)] \quad (6)$$

여기서, $Q^T = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ 및 R 은 n 시간 동안의 관측치와 모형에 의한 산정치를 나타내는 vector이며, I 와 Θ 는 모형의 입력변수와 모형의 매개변수를 나타내는 vector이다. 윗식에서 오차의 기준 E 와 함수 f 를 여러가지 방법(Clarke, 1973)으로 정의할 수 있으며, 유출 산정 함수 R 은 매개변수에 대해 직접 또는 간접적인 형태로 나타낼 수 있다. 다른 접근 방법으로 Sorooshian(1978)은 목적함수의 구성 및 관측오차가 응답면의 형태에 결정적인 영향을 미친다는 것과 관측오차가 推計學的 특성을 가질때 이를 고려한 산정기준의 필요성을 언급하고 Maximum Likelihood 이론에 의한 방법을 제안했다. 그러나 본 연구에서는 일반적인 確定論的 모형에서 이용되는 식 (7)과 같은 관측치와 산정치에 대한 偏差의 제곱의 합(sum of square of residual; SSR)을 목적함수로 선정하였다.

$$\text{Minimize } SSR = \sum_{i=1}^n (q_i - r_i)^2 \quad (7)$$

여기에서 q_i 는 시간 i 에서의 관측치를 나타내고, r_i 는 모형에 의해서 산정된 계산값을 나타내며 n 는 離散化된 관측 회수를 나타낸다.

3.2 決定變數의 選定 및 制約條件

식 (7)로 정의된 목적함수 값을 최소화하기 위한 저류함수 유출 모형의 매개변수 최적 보정을 위한 決定變數는 유역의 제반 조건과 水文 특성에 따라 보정하고자 하는 매개변수의 최종 보정치인 식 (5)의 $\Theta_0^T = (K, P, T_e, f, R_{ss}, K', P', T_e')$ 와 경험에 의해서 초기값으로 채택된 Θ_0 의 비율 vector인 $\Lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8)$ 로 된다.

현재 다목적댐의 운영 결과로써 보유하고 있는 댐홍수 유입량 자료는 주로 댐수위의 변화를 저류량의 변화로 환산하여 얻어졌기 때문에 수위관측 오차나 저수지 용량곡선의 오차로 인한 유입량의 변화가 상당히 커서 유입량 수문곡선이 툭니 모양의 불규칙한 오차를 포함하고 있으므로 模型 補正에 사용할시 보정의 정확도 측정이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 가정한 값으로 이미 알고 있는 매개변수를 가지고 유출 모형에 의해 모의 발생된 유입량 자료를 관측 유입량으로 사용하여 모형보정

에 관한 시험을 하는 合成補正(synthetic calibration) 방법에 의해 모형의 敏感度 分析, 최적화 모형의 수렴조건 결정 및 검증을 실시하였다.

Ibbitt 및 O'Donnell(1971)과 Johnston 및 Pilgrim (1976)은 유출모형의 매개변수가 유일하지 않고 개념적으로 현실적이지 못한 값으로 산정되는 이유로서 4가지 요인을 지적하였는데, (1) 모형 매개변수 간의 獨立性 결여; (2) 목적함수에 대해 민감도가 낮은 매개변수의 존재; (3) 목적함수의 不連續性; (4) Nonconvex 함수에 기인한 極大 또는 極小值(local optima)의 존재를 제시하였다. 또한 Sorooshian (1980)은 모형 보정의 목적을 우리가 이해하고 있는 물리적 시스템을 잘 표현할 수 있는 유일하고 개념적으로 현실적인 매개변수를 구하는 것과 단지 관측치와 모의 발생치가 근접하지만 매개변수의 개념적 현실성 여부는 고려하지 않고 매개변수를 구하는 것의 두가지로 구분하였으며, 위의 두 가지 사항 모두를 고려하지 않았을 때에는 비록 보정 기간에 대해서는 관측치와 모의 발생치의 보정이 잘 이루어졌다 하더라도 예측시에는 좋지 않은 결과를 초래할 수 있음을 지적하였다.

저류함수 유출모형의 매개변수 비율 Vector인 식 (5)로 정의된 8개의 결정변수를 동시에 고려하여 최적값 산정을 시도함에는 實時間 내의 계산에 어려움이 있을 뿐 아니라 상기에서 언급한 바와 같이 계산값의 唯一性이나 개념적으로 현실성 결여가 따를 수 있어 매개변수 비율 Vector인 $\Lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8)$ 에 대한 민감도 분석을 통하여 민감도가 낮은 변수를 제거하였다.

식 (7)로 정의된 목적함수의 제약 조건으로서는 유출모형의 모든 소유역에 대한 매개변수(결정변수)의 값이 陽의 값(non-negative values)을 가져야 한다. 또한 저류함수 유출모형의 물리적 개념상 매개변수 중 P, f, P' 값들은 1 이하의 값을 가져야 하므로 최적화 모형에서 모든 소유역에서의 초기값을 일정한 값(예, 0.5)으로 주어진다면 다음과 같은 제약 조건을 가져야 한다.

$$\Lambda \geq 0.0 \quad (8)$$

$$\lambda_2 \leq \frac{1.0}{P_0} \quad (9)$$

$$\lambda_4 \leq \frac{1.0}{f_0} \quad (10)$$

$$\lambda_7 \leq \frac{1.0}{P'_0} \quad (11)$$

여기서, Λ 는 식 (5)로 정의되는 매개변수의 비율 Vector이며, P_0, f_0, P'_0 는 각 소유역에서 가정한 매개변수인 P, f, P'의 초기값을 나타낸다.

위의 조건하에서 민감도 분석을 실시한 결과 다른 매개변수에 비해 민감도가 극히 적은 하도의 저류상수 K'와 P'의 비율값인 λ_6 와 λ_7 를 제외한 나머지 매개변수의 비율값 변화($\lambda_1, \lambda_3, \lambda_5, \lambda_8 : 0.1 \sim 5.0 ; \lambda_2, \lambda_4 : 0.1 \sim 2.0$)에 대한 목적함수 값인 SSR의 변화가 그림 1에 나타나 있다.

또한 민감도가 가장 낮은 하도의 저류상수인 K'를 제외한 다른 7개의 매개변수의 비율값을 1.0으로 지정하여 昭陽江댐에 대해 모의시간 72시간 동안의 시간별 발생된 합성 유량자료를 관측치로 가정하여 매개변수 보정 모형의 최적화 단계별 매개변수 비율값 변화 과정이 표 1에 나타나 있다. 표 1에 나타난 매개변수 보정과정의 값은 모든 매개변수의 초기의 비율값을 각각 0.5와 1.5로 주어 최적화 과정의 이들 두 가지 경우에 대한 평균값을 나타낸다.

위의 결과에서 매개변수 P'(λ_7)의 값이 참값인 1.0에 수렴하기 위해서는 후술할 수렴조건이 상당히 커야 하며, 민감도가 낮은 매개변수들이 수렴조건에 감수 횟수 증가에 따라 변화가 크음을 알 수 있다. 이와같이 민감도가 낮은 매개변수를 결정변수로 취

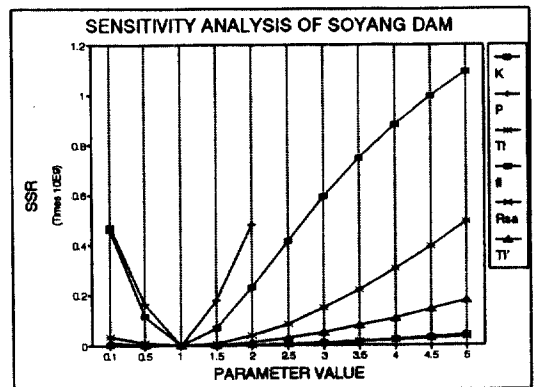


그림 1. 매개변수의 민감도 분석결과(소양강댐)

표 1. 수렴조건별 매개변수의 변화(소양강댐)

STEP*	1	2	3	4
CPU**	178	707	1442	4427
SSR	793847	9597	3509	103
$\lambda_1(K)$	1.10	1.07	1.06	1.01
$\lambda_2(P)$	1.00	0.97	0.97	1.00
$\lambda_3(T_e)$	0.90	1.01	1.00	1.00
$\lambda_4(f)$	1.30	0.99	1.02	0.99
$\lambda_5(R_{sa})$	1.20	0.69	0.76	0.96
$\lambda_7(P')$	0.60	0.48	0.51	0.58
$\lambda_8(T_e')$	0.90	0.97	1.00	1.01

*P-S법의 수렴조건인 Exploratory-Move시 증분 감소 횟수

**Intel 80386(16 MHz) Micro-processor에 의한 CPU 시간(초)

표 2. 매개변수 제거에 따른 산정 매개변수의 정확도(소양강댐)

제거 매개변수	STEP	CPU	SSR	BRM
$\lambda_4(T_1')$	1	90	1689023	0.240
	2	254	59316	0.220
	3	1913	7792	0.140
	4	4516	255	0.028
$\lambda_5(R_{sa})$	1	91	1176098	0.180
	2	253	24730	0.073
	3	781	7882	0.064
	4	1994	127	0.008
$\lambda_6(f)$	1	45	9	0.000

할 경우 목적함수의 뚜렷한 改善없이 수렴시간이 길어지거나 수렴조건의 감소횟수를 제한할 경우 매개변수들이 비현실적인 값으로 수렴할 가능성이 크다. 따라서 민감도가 극히 적은 K'와 P'를 결정변수에서 제외시켰으며, 선정된 6개의 변수중 f와 R_{sa}는 초기유출에, 하도의 지체시간 T_e'은 유역의 지체시간 T_e에 대해 서로 보완 관계에 있음을 고려하여 변수 f, R_{sa}, T_e'를 각각 한 변수씩 제외시켜 모의한 결과가 표 2에 나타나 있다.

표 2에서 BRM(Average Relative Bias)은 산정 매개변수의 정확도를 측정하는 값으로써 식 (5)와

같이 표시할 수 있다(Isabel 및 Villeneuve, 1986).

$$BRM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_i - \lambda_i^*|}{\lambda_i^*} \quad (12)$$

여기서, n는 매개변수의 수를, λ 와 λ^* 는 매개변수의 산정치와 참값을 각각 나타낸다. 표 2에서 알 수 있듯이 R_{sa}를 제거했을 경우의 BRM은 같은 수렴조건 하에서 T_e'를 제거했을 경우보다 적게 나타나며 f를 제거할 때 가장 빨리 참값에 수렴하였다. 따라서 상기와 같은 민감도 분석 결과로부터 최종적인 결정변수는 K'와 P' 및 f를 제거한 K, P, T₁, R_{sa}, T_e'의 5개로 선정하였다.

3.3 Pattern-Search(P-S) 技法의 適用

Hooke 및 Jeeves(1961)에 의해서 개발된 Pattern-Search(P-S) 기법은 探索移動(exploratory-move)과 標本移動(pattern-move)의 두 과정으로 나누어지며 이 과정의 반복시행에 의해 최적해를 찾아가게 된다. 탐색이동에서는 임의의 점에서 목적함수의 값이 개선될 수 있는 탐색경로의 방향을 결정하며, 표본이동에서는 탐색이동에서 결정된 방향으로 이동 구간을 증가시키면서 새로운 可能解로 이동한다.

n차원의 결정변수 벡터 $X^T = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 를 갖는 최적화 문제에 있어 벡터 X에 대한 增分값을 벡터 $E = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)$ 으로 정의할 때 표본이동의 방향을 결정하기 위한 탐색이동 과정으로 시도될 수 있는 결정변수의 위치 벡터는 다음과 같다.

$$X^*_{i,j} = X^*_{i,j-1} \pm E, \quad i=1, \dots, n \quad (13)$$

여기서, 벡터 $X^*_{i,j}$ 는 i번째 探索點을 기점으로 j번째 축방향으로 탐색 이동된 점을 나타내며, 증분 벡터 E의 원소 ϵ_j 는 해당축 방향 원소를 제외한 모든 원소가 지정된다. 초기 탐색점 $X^*_{1,0}$ 이 해당 영역내에서 선정되면 식 (13)에 의해서 각 축에 대한 가능 탐색점을 구하고 목적함수 값을 산정하여 개선여부를 조사한다. 모든 축에 대해서 이러한 과정을 순서대로 탐색하여 최종축에 대한 탐색점 $X^*_{1,n}$ 을 구한다.

이렇게 구한 최종 탐색점과 최초의 탐색점 $X^*_{1,0}$ 을 연결하는 직선이 표본 이동의 방향이 되며 外插法에 의해 표본이동을 실시한다. 표본 이동을 위하여 탐

색이동 과정에서 최종적으로 구해진 탐색점 $X^*_{1,0}$ 을 基底點 X_1 으로 정의하면 표본 이동점은 다음과 같은 식에 의해서 결정된다.

$$X^*_{2,0} = X^*_{1,0} + 2(X_1 - X^*_{1,0}) \quad (14)$$

여기서 $X^*_{2,0}$ 는 표본 이동에 의한 이동점으로 식 (13)에 의한 탐색 과정을 거쳐 다시 식 (14)에 의한 표본이동을 반복한다.

탐색과정에 있어 모든 매개변수에 대해서 어느 방향으로든 목적 함수가 개선되지 않을 경우에는 증분값을 일정비로 감소시켜 계산을 반복하는데 이의 감소 횟수를 계산의 수렴조건으로 하였다. 각 매개변수의 초기증분 값을 0.1로 하여 합성 유입량에 의해 모의한 결과 수렴조건이 2일 경우에는 합성 유입량과 모의 유입량과의 목적함수 값인 SSR은 급격히 감소하여 모형구성 및 자료관측에 따른 오차를 고려할 때 수렴조건이 2 이상에 대해서는 더 이상 증분값을 감소할 의미가 없어지는 것으로 나타났다.

4. 適用 및 分析

4.1 適用 概要

본 연구에서 개발된 최적화 기법에 의한 저류함수 유출모형의 매개변수 자동보정 기법을 소양강 다목적댐의 과거 홍수사상에 적용함으로써 그 효용성을 검증하였다. 또한 과거 홍수사상의 분석에 있어 강우 초기시간부터 임의로 지정된 현재 시간까지의 자료에 의해 자동으로 보정된 매개변수 값을 이용하여 임의의 현재시간 이후에 대하여 모형의 예측기능을 조사 분석하였다.

昭陽江 다목적댐 유역의 저류함수 유출모형의 구성은 그림 2와 같이 9개의 소유역과 6개의 하도로 구성되어 있으며, 댐지점 수위관측소 이외에 상류에 2개의 Telemetering(T/M) 수위 관측소가 있다. 댐 유역내에는 10개의 T/M 우량 관측소가 있어 Thiesen 분할법에 의거 각 소유역별로 평균 강우량을 산정하여 유출모형에 적용하였다.

각 소유역 및 하도별 저류함수 유출모형의 매개변수는 앞절에서 언급한 바와 같이 일본의 利根川을 대상으로 유도된 경험식에 의해 산정되어 유출해석의 초기값으로 이용되었으며, 그 값이 표 3에 나타나

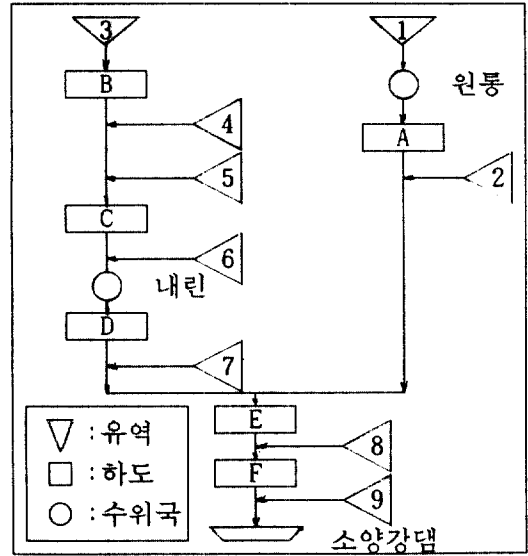


그림 2. 소양강댐의 저류함수 유출 모형도

표 3. 소양강댐의 소유역 및 하도별 매개변수 초기값

구 분	K, K'	T_e, T_e' (hr)	P, P'	f	R_{sa} (mm)
소유역 1	31.567	2.965	0.500	0.500	20.0
2	43.276	2.069	0.500	"	"
3	33.662	1.761	0.500	"	"
4	41.630	1.425	0.500	"	"
5	34.623	1.789	"	"	"
6	43.734	1.117	"	"	"
7	19.695	0.417	"	"	"
8	38.452	1.593	"	"	"
9	17.025	1.789	"	"	"
하도 A	14.434	0.158	0.600	1.000	0.000
B	38.782	0.330	"	"	"
C	34.373	0.367	"	"	"
D	21.954	0.264	"	"	"
E	0.000	0.703	0.000	"	"
F	0.000	0.321	0.000	"	"

있다(한국 수자원 공사, 1985). 각 홍수사상별 유출 해석은 이 초기값을 이용하여 유출해석한 모의 결과와 실측치와의 비교에 따라 肉眼判斷에 의거 매개변수를 수동으로 보정하여 사용하였다.

앞절의 분석 결과에 따라 저류함수 유출모형의 매개변수 중 민감도가 낮은 3개의 매개변수를 제외한 5개의 결정변수인 $\Theta_c^T = (K, P, T_e, R_{ss}, T_e')$ 에 대한 비올벡터 $\Lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5)$ 를 조정함으로써 목적함수값 SSR(sum of square of residual)을 최소화 할 수 있도록 하였다. 최적화 문제에 있어서는 앞절의 분석결과에 따라 결정변수에 대한 증분감소 횟수 2회를 수렴조건으로 하였다.

모형의 보정은 전체 담유역을 일괄적으로 댐 지점에서 1회 보정하는 대유역 보정 방법과 모형의 구성에 따라 분할된 소유역의 특성을 고려하기 위한 소유역별 보정이 필요하다. 그러나 각 소유역별 보정을 위하여는 각 소유역에 대한 유하량 관측자료가 필요하나 현재 소양강댐 상류에는 2개의 수위국 밖에 없어 수위국을 단위로하여 中流域 단위로 모형을 보정하였다. 이러한 대유역 보정방법과 증유역 보정방법을 90년 7월과 9월의 2개의 홍수사상에 적용하였다.

4.2 모형의 補正

소양강 다목적댐의 2개의 홍수사상에 대한 저류함수 유출모형의 매개변수 자동보정은 댐지점에서의 대유역 보정과 유역 중간의 인제 및 원통 수위표 지점에서 각각 보정하여 댐지점에서 최종 보정하는 증유역 보정방법을 채택하였으며 90년 7월 홍수사상에 대한 결과가 그림 3에 나타나 있고 90년 9월 홍수사상에 대한 결과가 그림 4에 나타나 있다.

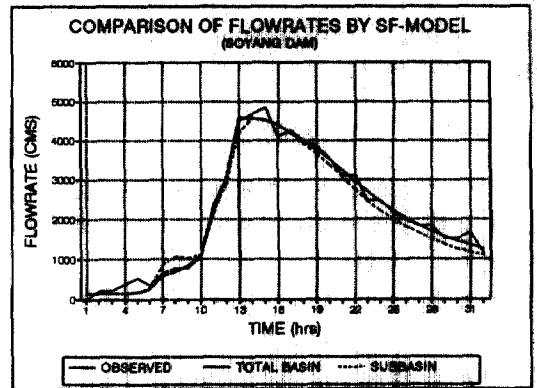


그림 3. 90년 7월 홍수 보정 유입량

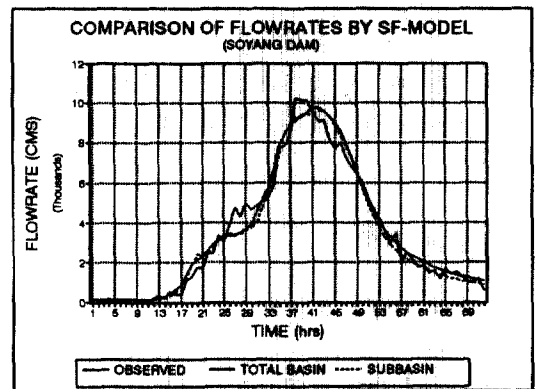


그림 4. 90년 9월 홍수 보정 유입량

표 4. 소양강댐의 매개변수 자동보정 결과

구 분	단위	'90년 7월 홍수		'90년 9월 홍수	
		대유역	증유역	대유역	증유역
관측 첨두유량	CMS	4850	4850	10214	10214
계산 첨두유량	CMS	4600	4582	9757	9468
분석기간	HRS	32	32	96	96
컴퓨터 CPU	SEC	120	176	496	697
SSR	10 ⁶	0.767	1.654	18.770	18.000
$\lambda_1(K)$		0.870	0.620	1.200	0.930
$\lambda_2(P)$		1.040	1.060	0.990	0.820
$\lambda_3(T_e)$		1.100	1.290	0.100	0.190
$\lambda_4(R_{ss})$		0.910	0.000	2.960	2.840
$\lambda_5(T_e')$		0.670	1.760	0.710	1.660

*Intel 80386(16 MHz) Micro-processor

이 그림들에서 알 수 있듯이 2개의 홍수사상에 대한 자동보정 결과가 관측 유입량 수문곡선과 매우 유사하며 대유역 보정시 댐지점에서의 수문곡선이 관측치와 더 근사함을 알 수 있다. 그러나 중유역 보정시 댐상류에 위치한 인제 및 원통수위표 지점에서의 水文曲線은 대유역 보정시 보다 월등히 관측치에 접근하였다.

표 4 및 그림 5에는 자동보정된 결과에 의해 수렴된 매개변수의 값 및 모의 운영 결과가 나타나 있다. 이 표와 그림에서 알 수 있듯이 저류상수인 K와 P가 비교적 일정한 값으로 수렴하나 포화우량과 유역 지체시간의 경우 유역의 지체시간이 크면 포화우량 값이 작고, 포화우량 값이 크면 유역의 지체시간이 작아지는 경향을 보인다. 이로써 유역의 지체시간과 포화우량이 서로 간섭함을 알 수 있으며 두 매개변수 중 어느 하나가 상당한 수준으로 정확하다고 판단되면 그 변수를 제거함으로써 나머지 매개변수의 維一性을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 산정된 매개변수의 오차는 매개변수의 유일성의 결여 및 수렴조건의 제한에 의한 것 이외에 강우 및 유량자료의 오차를 큰 원인으로 들 수 있다.

한편 시행착오에 의한 매개변수의 수동보정을 시도한 결과 非專門家는 보정이 거의 불가능하였으며, 홍수조절 업무에 종사하는 전문가가 시도하였을 경우 보정시간이 상당히 소요되어도 모의한 수문곡선이 관측치와 매우 相異하였다.

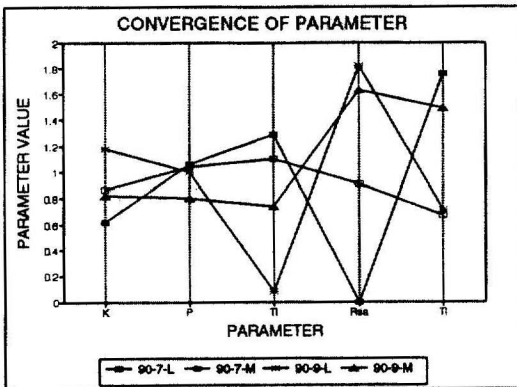


그림 5. 소양강댐 홍수사상별 수렴 매개변수

4.3 模型의 豫測性 分析

최적화 기법에 의해 자동보정된 모형의 예측성을 검토하기 위하여 소양강댐의 90년 7월의 강우시작 시점부터 홍수완료 시간인 70시간 동안의 洪水事象을 이용하여 분석하였다. 댐지점에 尖頭 홍수가 도착하기 이전인 예측시점 9, 11, 13시간까지의 보정된 매개변수를 입력하여 예측 시점 이후의 수문곡선을 예측하여 관측 수문곡선과 비교하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 첨두 유입량이 나타나기 직전인 예측시점이 13시간인 시점 이후의 예측 수문곡선이 관측치와 매우 유사하게 접근함을 알 수 있다. 그림 7은 소양강댐의 90년 9월의 大洪水 사상에 대하여 개발된 모형의 예측성을 검토한 결과로써 7월 홍수와 마찬가지로 36시간 시점에서 예측한 결과가 관측치와 매우 유사함을 보여준다.

상기의 분석결과 실시간 보정된 유출모형의 첨두 홍수량 예측을 위한 적정 예측시간은 3시간 정도로 판단할 수 있으며 이러한 유효예측 시간을 증대시키기 위해서는 전체유역을 댐지점에서만 보정하는 대유역 보정 대신에 소유역별 보정이나 유역을 대표할 수 있는 유일성이 높은 매개변수의 산정방법이 필요하다.

그러나 소유역별 유입량 관측자료가 없어 수위 관측지점을 중심으로 중유역 보정한 결과 그림 6 및 그림 7에서 알 수 있듯이 중유역 보정에 따른 豫測性이 대유역 보정결과 보다 관측치에 더욱 근접함을 알 수 있다.

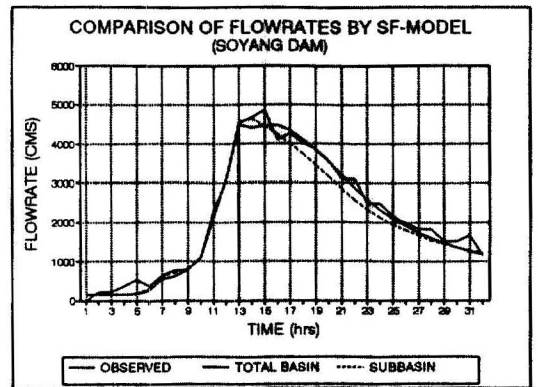


그림 6. 소양강댐 90년 홍수의 예측결과(예측점 13 시간)

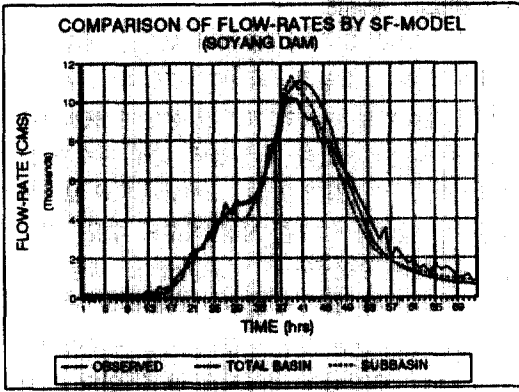


그림 7. 소양강댐 90년 9월 홍수의 예측결과(예측점 36시간)

위에서 언급한 중유역별 보정은 상류 수위국의 유량측정 결과가 정확해야 최종적으로 댐지점에서의 예측오차를 줄일 수 있으며 유량측정 자료가 부정확할 때는 중유역 보정의 의미는 사라지고 예측 결과에 있어 상당한 오차를 유발시킬 수 있다. 따라서 유출모형에 의한 정확한 예측을 위해서는 더 많은 소유역 보정이 가능한 정확한 유량자료가 필요하다.

5. 結 論

본 연구에서는 최적화 기법을 이용하여 貯留函數 유출모형의 매개변수를 자동으로 보정할 수 있는 방안을 제시하였다. 자동보정 기법의 적용 결과 시행착오에 의한 수동보정 방법보다 자동보정 방법이 시간과 노력면에서 보다 효율적이며 관측치에 더욱 근사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 특히 자동보정 방법은 意思 決定을 매우 짧은 시간에 완료해야 하는 다목적댐의 홍수예측 및 홍수조절을 위한 실시간 운영에 매우 바람직하게 이용될 수 있다 (高錫九 등, 1992).

그러나 자동보정에 의해 보정기간 동안에 산정된 매개변수를 예측에 사용할 때에는 매개변수의 상호작용으로 상당한 오차가 발생할 우려가 있으므로 예측시에는 산정된 매개변수 값의 유일성을 신중히 고려하여야 한다. 또한 모형이 유역의 특성을 대표할 수 있도록 매개변수의 유일성에 대한 程度를 높이기

위하여 가능한한 소유역별 보정을 실시하여야 한다. 아울러 程度 높은 예측을 위해서는 더 정확하고 많은 자료를 이용하여 매개변수의 유일성을 높일 수 있는 방안이 연구되어야 하며, 소유역별 모형 보정을 위하여 각 소유역 및 하도에 대한 정확한 유량측정 등 기초 수문자료 확보가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Clarke, R.T. (1973), *Mathematical Models in Hydrology*, Food and Agriculture Organization (F.A.O.) of the United Nations, pp.152-157, Rome.
2. Gupta, V.K. and S. Sorooshian (1985), "The Automatic Calibration of Conceptual Catchment Models Using Derivative-Based Optimization Algorithms", *Water Resources Research*, Vol. 21, pp.473-485.
3. Hendrickson, J.D., S. Sorooshian and L.E. Brazil (1988), "Comparison of Newton-Type and Direct Search Algorithms for Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models", *Water Resources Research*, Vol. 24, pp.691-700.
4. Hooke, R. and T.A. Jeeves (1961), "Direct Search Solutions of Numerical and Statistical Problems", *J. assoc. Comput. Mach.*, 8(2), pp.212-229.
5. Ibbitt, R.P. and T. O'Donnell (1971), "Fitting Methods for Conceptual Catchment Models", *J. of Hydraulic Eng.*, 97(HY9), pp.1331-1342.
6. Isabel, D. and J. Villeneuve (1986), "Importance of the Convergence Criterion in the Automatic Calibration of Hydrological Models", *Water Resources Research*, Vol.22, pp.1367-1370.
7. Johnston, P.R. and D. Pilgrim (1976), "Parameter Optimization for Watershed Models", *Water Resources Research*, 12(3), pp.477-486.
8. Nelder, J.A. and R. Mead (1965), "A Simplex Method for Functional Minimization", *Comput. J.*, 7 (4), pp.308-313.
9. Reklaitis, G.V., A. Ravindran and K.M. Ragsdell (1983), *Engineering Optimization*, Wiley-Interscience.
10. Rosenbrock, H.H. (1960), "An Automatic Method of Finding the Greatest of Least Values of a Function", *Comput. J.*, p.175-184.
11. Sorooshian, S. (1978), "Considerations of Stochastic Properties in Parameter Estimation of Hydrologic Rainfall-Runoff Models", Ph. D. Dissertation,

- University of California, Los Angeles.
12. Sorroshian, S. (1980) "Comparison of Two Direct Search Algorithms used in Calibration of Rainfall-Runoff Models" in *IFCA: Symposium on Water and Related Land Resource Systems*, pp.477-485, Pergamon, New York.
 13. Sorooshian, S. (1988), "Parameter Indentifiability in Conceptual Rainfall-Runoff Models", *Computerized Decision Support Systems for Water Managers, Proceedings of the 3rd Water Resources Operations Management Workshop*, Sponsored by the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, pp.173-183.
 14. Sorooshian, S. and V.K. Gupta, (1983) "Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Model Parameters: The Question of Parameter Observability and Uniqueness", *Water Resources Research*, **21**(4), pp.260-268.
 15. 高錫九, 李翰九, 李熙昇(1992), "洪水時 貯水地 實時間 運營 意思決定 支援 시스템", *대한토목학회 논문집*, **12**(1), pp.131-140, 1992.
 16. 南宮達(1985), "貯留函數法에 의한 降雨-流出模型의 變數推定", *韓國水文學會誌*, 第18卷, 第2號, pp. 175-185.
 17. 尹龍男(1986), *工業水文學*, pp.332-357.
 18. 韓國水資源公社(1985), "多目的댐 洪水流出 解析 研究(貯留函數法)".
 19. 韓國水資源公社(1991), "貯水地 水門 操作을 위한 洪水 流入量의 豫測模型開發 報告書".
 20. 木村俊晃(1961), "貯留函數による 洪水流出追跡法", 建設省 土木研究所.

(接受 : 1992. 3. 26)