

유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정 Automatic Parameter Estimation Considering Runoff Components on Tank Model

배 덕 호* / 정 일 원** / 강 태 호*** / 노 준 우****

Bae, Deg Hyo / Jeong, Il won / Kang, Tae Ho/ Noh, Joon Woo

Abstract

The objective of this study is to propose an automatic parameter estimation scheme considering runoff components of Tank model. It estimates model parameters by Powell's automatic algorithm based on the runoff component separation of the observed hydrograph by using digital filter method. The selected study areas are the 4 main dam sites on the Han River. The simulated flows are compared with the observed flows depending on whether runoff component consideration or not. As a result, the estimated model parameters from classical Powell's method only can relatively well simulate the time variation of total runoff, but gives poor runoff component simulations. Therefore, it can be concluded that the proposed automatic parameter estimation scheme in this study is more reliable and objective.

Keywords : Tank Model, runoff components, parameter estimation, Powell's method, Han River

요 지

Tank 모형의 매개변수를 추정하는데 있어 유출성분을 고려하여 모의할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 관측수문곡선을 Digital filter 방법을 사용하여 유출성분별로 분리하고 각 유출성분을 고려하여 Powell 방법으로 매개변수를 추정하는 것이다. 본 연구에서는 한강유역의 4개 댐지점을 선정하여 유출성분을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 모의유량을 관측유량과 비교·검토하였다. 그 결과 자동추적법으로만 매개변수를 추정할 때에는 전체적인 유출량은 모의하지만 성분별 유출량은 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 유출성분을 고려하는 방법이 더 객관적이고 정확한 매개변수를 추정하는 방법으로 판단되었으며, 자동추적법을 사용하여 매개변수를 추정할 때는 유출성분을 고려하여 매개변수를 추정하는 것이 보다 타당할 것이다.

핵심용어 : 탱크모형, 유출성분, 매개변수 추정, Powell 방법, 한강

* 세종대학교 수문연구소 · 토목환경공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(E-mail : dhbae@sejong.ac.kr)

** 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

*** (주)삼안건설기술공사 수력부 부장

Chief, Dept. of Hydro-Power, Saman Engineering Consultants ., LTD., Kyonggi-do 427-800, Korea

**** 미국 Colorado State University 연구원

1. 서론

수문학적 강우-유출 해석은 수자원의 효율적 보존 및 활용을 위해서 중요한 문제 가운데 하나이며, 특히 이수측면에서 자연상태의 갈수량 실태를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 자연하도의 갈수량은 수위 및 유량 관측자료로부터 평가가 가능하나, 국내의 경우 유역 출구의 관측 수위표 지점이 적고 갈수시에는 수위-유량 관계식이 부정확한 것으로 알려져 있으며 유역내 댐과 같은 수공구조물에 의해 대부분의 본류 하천 유량이 조절되므로 본류 지점에서 자연상태의 갈수량을 얻는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 지금까지의 유량해석은 강우-유출모형을 이용하여 유출량을 모의하는 방법을 사용하고 있는 실정이다.

자연계의 강우와 유출의 물리적 관계를 수학적으로 표현한 강우-유출 모형은 모형 고유의 매개변수들을 포함하고 있는데 정확한 유출해석을 하기 위해서는 대상 유역의 유출특성을 반영하는 유역 고유의 매개변수 추정 및 선결되어야 한다. 그러나 대부분의 비선형 강우-유출모형의 매개변수들은 이론적으로 계산해 낼 수 없는 미지의 값들이므로 기지의 강우와 유출 자료를 이용하여 가능한 한 정확하고 신뢰성 있게 추정하여야 한다. 지금까지 강우-유출모형의 매개변수를 추정하기 위해서 많은 연구(예, 심순보 등, 1992; 배덕효 등, 1999)가 진행되었다. 특히 본 연구에서 적용하고자 하는 탱크모형(Tank model)의 매개변수 추정에 관해서는 박승우(1993), 이관수 등(1995), 이상호(1998), 김현영과 박승우(1998), 이동률 등(1999), 신성철 등(2001) 등의 연구가 있다. 그러나 아직까지 지표유출, 중간유출 및 기저유출 등 유역의 유출 특성을 반영하는 매개변수 추

정방법은 정립되어 있지 못한 실정이다.

본 연구에서는 유출성분을 고려한 탱크모형의 매개변수 자동추적 방법을 제안하고자 한다. 그 방법은 계측지역의 수문곡선을 digital filter 방법을 사용하여 유출성분(지표면유출, 중간유출, 기저유출)을 분리하고 매개변수 자동추적법 중의 하나인 Powell 방법으로 추정된 매개변수를 비교·검토하여 총유출량뿐 아니라 유출성분의 모의 정확도를 고려한 적정 매개변수를 추정하는 것이다. 이는 강우-유출모형을 이용하여 미계측유역의 저수유출을 모의할 경우 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 유출성분을 고려한 매개변수의 추정과 검증을 실시하여 적합성을 검토하고, 미계측 유역에 그 적용성을 검토하였다.

2. Tank 모형의 개요

탱크모형은 일본의 Sugawara가 1961년 처음 개발한 모형으로 유역을 여러 개의 저류형 탱크로 가정하여 강우-유출 과정을 모형화 한 것으로 하천유출과 관련된 일종의 개념적 수문모형이다. 그림 1은 장기유출 해석에 일반적으로 사용되는 4단 탱크모형을 나타낸 것이다. 일반적으로 이 모형은 유역 대수층의 구조에 대응한다는 개념을 가지고 있으며, 4단 탱크모형을 유역의 유출 현상에 대응시켜서 생각하면 다음과 같다.

유역의 지표면에 내린 강우는 지표면 저류, 침투, 증발산 등 초기손실이 발생하고 지표면 유출이 시작된다. 그림 1의 1단탱크 아래쪽의 유출공이 바닥에서 조금 위쪽에 붙어 있는 것은 이 초기손실에 대응하기 위한 것이다. 그 후 강우가 계속되면 지표면 유출이 점점 증가하는데 이것은 1단탱크 위쪽의 유출공에서의 유출을 나타낸다. 즉, 1단탱크의 유출은 지표면 유출(Q_s)에 해당

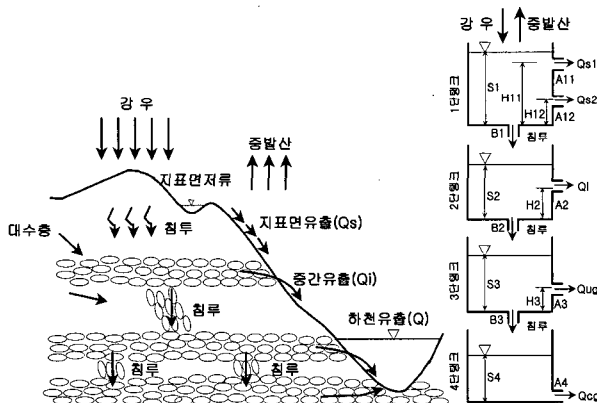


그림 1. 탱크모형의 유출 개념도

한다. 한편, 지면에 내린 강우의 일부는 지표하로 침투하며 이는 1단탱크의 바닥면에 붙어있는 침투공에 대응한다. 지표하로 침투한 강우의 일부는 다시 지표면으로 유출되는데 이와 같은 유출은 2단탱크 측면의 유출공을 통한 유출에 대응하며 이를 중간유출(Q_i)이라 한다. 침투한 나머지 강우는 다시 깊이 침투해 안정한 지하수 유출로서 갈수시에 완만하게 하천으로 유출한다. 이것은 3단 및 4단탱크의 측면 유출공에 대응하는 지하수 유출이다. 여기서 3단탱크는 비피압 지하수 유출(Q_{ug}), 4단탱크는 피압 지하수 유출(Q_{cg})에 대응한다. 이런 과정을 통하여 유역의 하천 유출량은 각 탱크에서의 유출량의 합으로 산정된다.

3. 매개변수 추정기법

3.1 매개변수 초기치 선정

최적화 기법에 의해 탱크모형의 제 매개변수를 추정하기 위해서는 먼저 매개변수의 초기치가 요구된다. 적절한 초기치 선정은 매개변수가 물리적 의미를 가지도록 할 뿐 아니라 계산 시간을 절약하는 데에도 중요한 역할을 한다. 매개변수가 수문학적 현상에 대해 물리적인 의미를 가지고 있다면 특정 유역의 기상 및 유역 특성 자료로부터 초기 매개변수 값을 선정할 수 있다. 4단 탱크모형의 매개변수는 표 1과 같이 총 16개이며 각 단의 초기 저류고 4개는 유량자료를 이용하여 선정할 수 있고, 수문자료로부터 선정할 수 없는 나머지 매개변수들은 각 변수들이 갖는 물리적 의미와 유역의 특성을 고려하여 선정할 수 있다(건설교통부, 1997).

3.2 Powell의 최적화 방법

Powell 방법(Kuester 등, 1973)은 제약조건이 없는 목적함수(이동률 등, 1999)의 최적화 방법으로 공액법(conjugate method)이라고도 한다. 그림 2에서와 같이 방향은 같으나 다른 시작점에서의 1차원 탐색결과로서 얻어진 최소점 1, 2를 연결한 선은 최적값을 향하

게 되는데 이 선의 방향을 공액방향이라 한다. Powell은 N차원 상에서 공액방향을 결정하여 목적함수의 최소값을 찾는 방법을 제시했는데 기본개념은 다음과 같다. 먼저 식 (1)과 같이 초기방향벡터 u_i 를 단위벡터 e_i 로 정한다. 그 다음 아래의 과정을 식 (2)의 F_s 가 허용치를 만족할 때까지 반복하여 최적매개변수를 결정한다. 식 (1)에서 n은 매개변수의 개수를 나타내고 식 (2)의 FP는 이동하기 전, FRET는 이동한 후의 목적함수 값을 의미한다.

첫째, 초기 매개변수 셀 P_0 를 결정한다.

둘째, $i=1, \dots, n$ 까지에 대해 P_{i-1} 을 u_i 방향으로 1차원 탐색하여 최소점으로 이동하고 이 점을 P_i 라 한다.

셋째, $i=1, \dots, n-1$ 까지에 대해 방향벡터 u_{i+1} 을 u_i 로 대체하고 $P_N - P_0$ 를 u_N 으로 교체한다.

넷째, u_N 방향으로 1차원 탐색하여 P_N 을 최소점으로 이동한 후 그 점을 P_0 라 하고 둘째단계부터 다시 반복한다.

$$u_i = e_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

$$F_s = \frac{2|FP - FRET|}{|FP| + |FRET|} \quad (2)$$

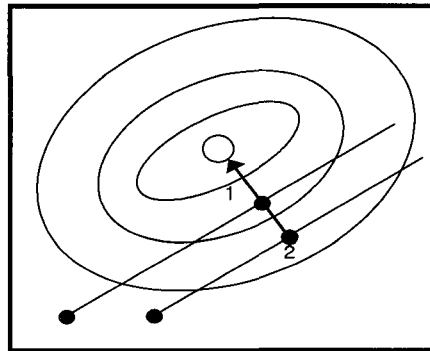


그림 2. 2차원 공간에서의 공액방향

표 1. 탱크모형의 매개변수

구분	1단탱크		2단탱크	3단탱크	4단탱크
유출공계수	상부	A11	A2	A3	A4
	하부	A12			
유출공높이	상부	H11	H2	H3	-
	하부	H12			
침투공계수	B1		B2	B3	-
탱크저류고	TANK1		TANK2	TANK3	TANK4

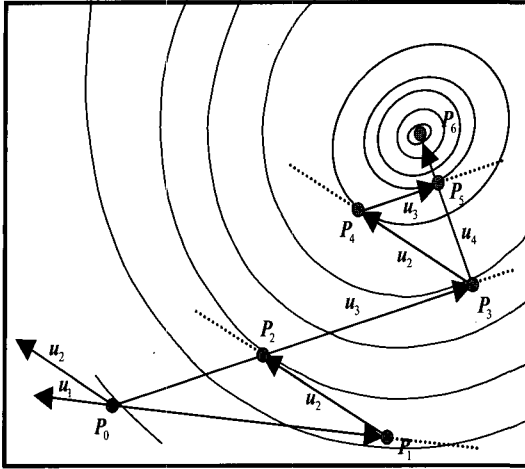


그림 3. 2차원 공간에서의 Powell 방법에 의한 최소값 탐색

그림 3은 2차원 공간에서 Powell 방법에 의해 최소값 P_6 을 추정해 가는 과정을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 2차원인 경우 초기값 P_0 에서 2개의 방향벡터가 존재하므로 먼저 u_1 방향으로 1차원 탐색하여 P_1 으로 이동하고, 다시 u_2 방향으로 탐색하여 P_2 로 이동한다. 그 후 $\overline{P_0P_2}$ 방향인 새로운 방향벡터를 u_3 라 할 때 u_3 방향으로 1차원탐색을 실시하여 공액점 P_3 을 찾는다. 또 다른 공액점 P_5 는 P_3 를 찾는 것과 동일한 방법으로 찾을 수 있다. 이 때 $\overline{P_3P_5}$ 방향이 공액방향이 되므로 u_4 방향으로 탐색하여 최소값 P_6 을 찾게된다.

한편, Powell 방법에서의 1차원 탐색은 황금분할법과 2차원 보간법에 근거를 두고 있다. 황금분할법은 1차원 탐색기법에서 최소값이 존재하는 구간을 결정하는 방법이며, 2차원 보간법은 해당 구간 내에서 최소값을 결정하는 기법이다. 그림 4와 같이 세 점 a' , b' , c' 에서의 함수값 $F(a')$, $F(b')$, $F(c')$ 를 비교하면 $F(a') > F(b')$, $F(c') < F(b')$ 이므로 구간 $[a', c']$ 에서는 최소값이 존재하지 않는다. 따라서 황금분할법에 의해 새로운 점 c 를 찾고 b' 를 a 로, c' 를 b 로 교체한 후 함수값이 $F(a) > F(b)$, $F(c) > F(b)$ 를 만족하는 구간 $[a, c]$ 를 찾을 때까지 반복하여 구간을 찾는 것이 황금분할법이다. 그 다음, 그림 5에서와 같이 구간 $[a, c]$ 에서 $F(a)$, $F(b)$, $F(c)$ 세 점을 있는 포물선(그림 5의 점선)은 하나 뿐이라는 정의를 이용하여 세 점을 지나는 포물선의 극점 x 를 식 (3)으로 구한다. x 의 위치가 b 와

c 사이에 있고 $F(x)$ 가 $F(b)$ 보다 작으므로 새로운 구간 $[b, c]$ 에서 다시 $F(b)$, $F(x)$, $F(c)$ 를 지나는 포물선(그림 5의 일점쇄선)의 극점을 구한다. 위 과정을 허용치 안에 들 때까지 반복함으로써 최소점을 찾게 된다. Powell 방법은 직접탐색법에 기초한 지역최적화 방법으로 매개변수 추정시 초기치에 영향을 많이 받는다. 따라서 적절한 초기 매개변수 산정이 우선되어야 한다.

$$x = b - \frac{1}{2} \frac{(b-a)^2 [f(b) - f(c)] - (b-c)^2 [f(b) - f(a)]}{(b-a)[f(b) - f(c)] - (b-c)[f(b) - f(a)]} \quad (3)$$

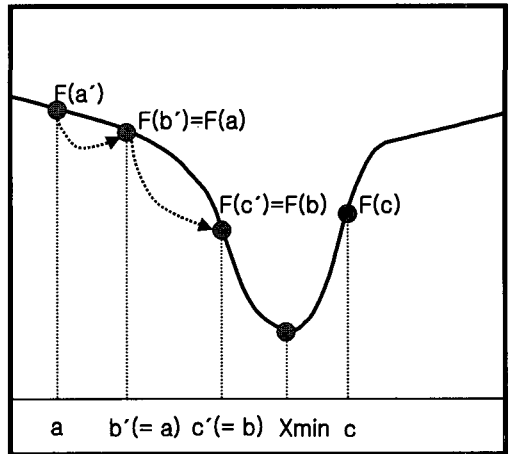


그림 4. 황금분할법

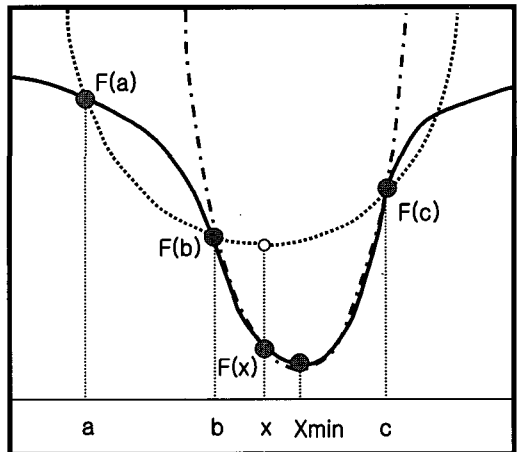


그림 5. 2차원 보간법

3.3 Digital Filter 방법

본 연구에서는 Digital filter 방법을 사용하여 관측 수문곡선을 지표수, 중간유출 및 기저유출로 분리하고 탱크모형에 의해 모의된 각 성분별 유량과 비교·검토 후, 정확도 허용오차 범위를 벗어날 경우 총유출량의 각 유출성분비를 고려하여 매개변수를 추정하였다. 연속적인 수문곡선 분리방법인 Digital filter 방법(Abu El-Nasr 등, 2002)은 전자신호를 해석하고 처리하는데 사용되는 방법으로 빈도가 높은 신호와 낮은 신호를 분리한다. 이 방법은 수문곡선 상에서 높은 빈도인 지표 유출과 낮은 빈도인 기저유출을 필터방정식을 통해서 분리하는 방법이다. 식 (4)는 필터 방정식을 나타낸 것이다.

$$q_t = \beta q_{t-1} + (1 + \beta)/2 \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (4)$$

여기서 q_t 는 시간 t 에 대한 직접유출량(quick response flow)이고 Q 는 총유출량(total flow), β 는 필터계수로서 0.925(Nathan과 McMahan, 1990)를 사용한다. 기저유출은 식 (5)에서 보는 바와 같이 총유출에서 q_t 를 감해서 산정한다.

$$b_t = Q_t - q_t \quad (5)$$

디지털 필터 방법은 총 3번의 패스(전진, 후진, 다시 전진)를 통해서 수문곡선을 분리한다. Arnold 등(1995)은 3번째 패스된 유량을 기저유출량으로 사용했다. Abu El-Nasr 등(2002)은 총유출에서 첫 번째 패스한 유량을 감하여 직접유출을 분리하였고, 첫 번째 패스한 유량에서 세 번째 패스된 유량을 감해서 중간유출량을 산정하는 방법을 제시하였다.

3.4 유출성분을 고려한 매개변수 추정

실제 하천유량은 지표면유출, 중간유출, 기저유출의 합으로 구성된다. 이와 같은 유출 성분별 유량분석은 유역 고유의 유출특성을 이해하는데 중요한 역할을 한다. 특히 기저유출량은 장기유출에서 중요한 저수유출을 해석하는데 필수적인 요소이며 기저유출량에 대한 정확한 평가는 유역의 저수특성을 파악할 수 있게 한다. 따라서 본 논문에서 제시한 유출성분을 고려한 탱크모형의 매개변수 추정방법은 유출총량뿐 아니라 각 유출성분을 정확히 모의할 수 있도록 모형의 매개변수를 추

정하므로, 유역의 수문특성이 동일한 타 미계측 유역의 저수유출을 보다 정확히 모의할 수 있게 된다. 본 연구에서 제안한 유출성분을 고려한 매개변수 추정방법의 개요는 그림 6과 같다. 우선 연구대상 지역의 수문 관측자료로부터 모형 매개변수의 초기추정 및 Powell 방법에 의한 자동추적을 실시하여 해당지역의 매개변수 셸을 구한 다음, 탱크모형에 의해 유출총량뿐 아니라 지표유출, 중간유출 및 기저유출을 모의한다. 그 후 관측 수문곡선을 Digital filter 방법으로 각 성분별로 분리한 후, 탱크모형에 의해 모의된 각 성분별 유출량과 비교·분석한다. 유량총량뿐 아니라 각 성분별 유출량의 관측치와 계산치가 오차의 허용범위 이내이면 매개변수 추정을 종료하지만, 유출총량 또는 각 유출성분 가운데 어느 하나의 요소라도 허용오차를 벗어날 경우 Powell에 의한 매개변수 자동추적을 재실시하여 허용범위 이내에 들도록 한다. 그 후 모형의 매개변수를 고정된 상태에서 또 다른 강우사상에 대해 유출총량 및 유출성분별 유량을 모의하고, 관측유량과 비교하여 모형의 정확도를 평가한다.

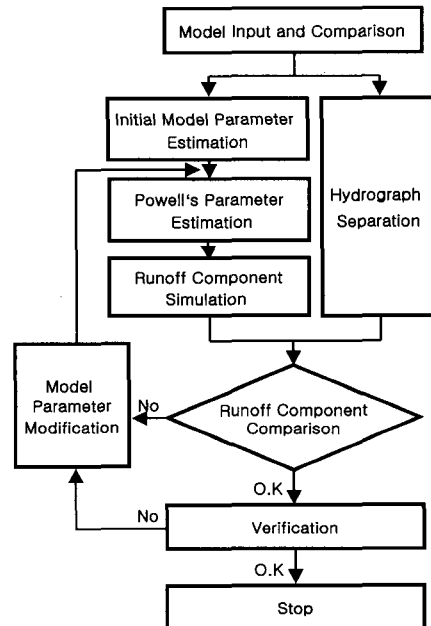


그림 6. 유출성분을 고려한 매개변수 추정 알고리즘

표 2. 모형의 매개변수 추정기간 및 검증기간

대상지점	유역면적(km ²)	전체자료기간	매개변수 추정기간	검증기간
화천댐	3,901.0	34년(1967-2000)	11년(1990-2000)	23년(1967-1989)
소양강댐	2,703.0	27년(1974-2000)	11년(1990-2000)	16년(1974-1989)
충주댐	6,661.0	15년(1986-2000)	7년(1994-2000)	8년(1986-1993)
괴산댐	671.0	19년(1982-2000)	7년(1994-2000)	12년(1982-1993)

4. 적용 및 분석

우리 나라의 경우 1980년대까지 유량관측은 주로 홍수위를 대상으로 하여 왔다. 따라서, 일년 중 2/3을 차지하는 저수위시의 유량산정은 신뢰성 있는 수위-유량 관계의 부족으로 실측자료에 의해서는 매우 어려움이 많았다. 그러나, 1970년대 이후 여러 다목적댐이 건설된 후 수집된 유입량 자료가 축적되어 댐 상류의 큰 인위적인 영향이 없는 경우 유역의 자연 유출특성을 파악

할 수 있는 기본 자료로 이용할 수 있는 정도가 되었다. 따라서 본 연구에서는 한강유역의 화천댐, 소양강댐, 괴산댐, 충주댐 4개 지점을 선정하여 본 논문에서 제안한 유출특성을 고려한 탱크모형의 매개변수 추정방법의 유용성을 검증하고, 춘천댐유역을 대상으로 미계측 유역에서의 유출특성 파악문제의 가능성을 검토하였다. 본 논문에서 사용한 자연유출량 자료는 한국수자원공사와 한국수력원자력(주)에서 운영하고 있는 댐 유입량 자료를 이용하였다. 표 2는 적용 대상지점의 유역면적과 모형의 매개변수 추정 및 검증에 사용된 자료기간을 나타낸 것이다. 화천댐 유역과 소양강댐 유역은 11년간의 자료를 모형의 매개변수 추정기간으로 선택하였고 나머지 자료기간에 대해서 검증을 하였다. 자료기간이 상대적으로 짧은 충주댐 유역과 괴산댐 유역은 7년간을 매개변수 추정기간으로 나머지 기간을 검증기간으로 정하여 모형의 계산 및 검증을 실시하였다.



그림 7. 적용 대상유역 적용 및 분석

4.1 매개변수 추정 및 유출성분별 비교

건설교통부(1997)에서 제안한 방법으로 산정된 표 3의 초기 매개변수를 이용하여 Powell의 자동추적법으로 탱크모형의 매개변수를 산정하였다. 표 4는 모형 적용대상 유역인 4개 댐유역에 대한 Powell 방법에 의해 추정된 매개변수를 나타낸 것이고, 표 5는 모형 계산기간동안 관측유량과 계산유량에 대한 통계치 결과를 나

표 3. 탱크모형의 초기 매개변수값

구분	1단탱크		2단탱크	3단탱크	4단탱크
	상부	하부			
유출공계수	상부	0.30	0.90	0.07	0.001
	하부	0.50			
유출공높이	상부	40.0	10.0	10.0	0.0
	하부	20.0			
침투공계수	0.30		0.80	0.006	-
초기저류고	0.0		0.0	30.0	250.0

표 4. Powell 방법에 의해 추정된 매개변수값

유역	매개변수											
	A ₁₁	A ₁₂	B ₁	A ₂	B ₂	A ₃	B ₃	A ₄	H ₁₁	H ₁₂	H ₂	H ₃
화천	0.376	0.106	0.085	0.262	0.0848	0.0140	0.0060	0.0017	55.5	22.1	8.2	13.5
소양	0.354	0.094	0.085	0.050	0.0338	0.0006	0.0571	0.0006	40.0	16.8	11.2	10.0
충주	0.401	0.163	0.090	0.160	0.1598	0.1558	0.0091	0.0241	54.9	33.8	5.6	10.0
괴산	0.532	0.100	0.159	0.076	0.0734	0.0056	0.0141	0.0005	41.4	12.1	16.5	8.1

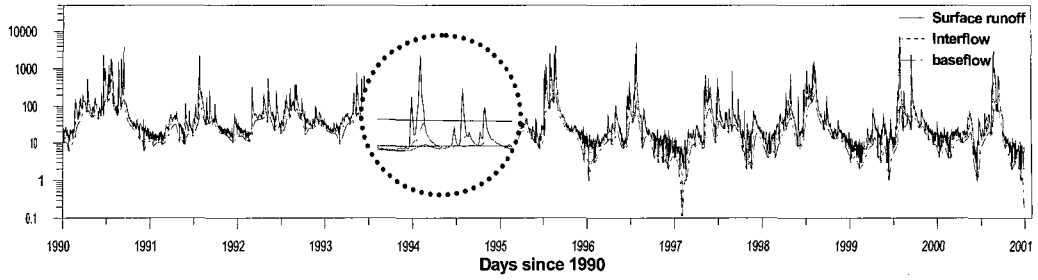
표 5. 매개변수 추정기간의 관측유량과 계산유량의 통계적 결과

통계치	유역	화천댐		소양강댐		충주댐		괴산댐	
		관측치	계산치	관측치	계산치	관측치	계산치	관측치	계산치
평균유출량(m ³ /sec)		89.6	87.8	74.9	75.4	153.0	155.3	13.9	14.2
최대유출량(m ³ /sec)		7279	7080	7063	4175	8776	5108	1059	736
최소유출량(m ³ /sec)		0.0	3.6	0.0	2.8	4.1	0.6	0.2	0.3
유출율(%)		64.3	63.0	68.0	68.5	59.0	60.0	52.4	53.2
유출용적(ton)		3.1E+10	3.1E+10	2.6E+10	2.6E+10	3.4E+10	3.4E+10	3.1E+9	3.1E+9
유출용적 오차(%)		-1.98		0.58		1.54		1.59	
평균제곱근오차(mm/day)		2.78		4.90		2.32		2.71	
상관계수		0.92		0.79		0.92		0.91	

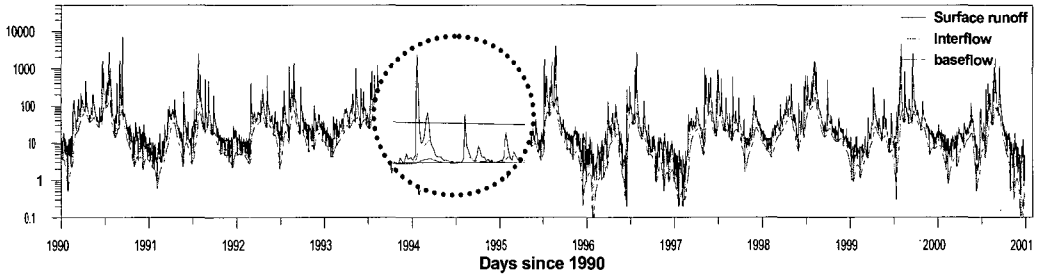
타낸 것이다. 표 5에서 알 수 있는 것과 같이 유출용적 오차는 모두 2% 이내로 잘 일치하였으며 화천댐 유역이 -1.98%로 가장 큰 차이를 소양강댐 유역은 0.58%로 가장 작은 차이를 나타냈다. 평균제곱근오차는 소양강댐이 4.90mm/day로 가장 높게 나타났으나 모두 5.0mm/day 이하의 값을 보여주고 있어 각 유역별로 추정된 매개변수는 적절하게 추정되었다고 판단된다. 상관계수는 소양강댐 유역이 0.79로 다소 상관성이 낮게 나타났으나 나머지 유역은 높은 상관성을 나타내었다.

표 4와 같이 산정된 모형 매개변수의 유출성분별 모의능력을 검토하기 위하여 해당 유역의 관측 수문곡선을 Digital filter 방법을 사용하여 그림 8과 같이 지표면, 중간, 기저유출로 분리하였다. 분리한 결과 성분별 평균 유출량의 크기는 표 6에서 알 수 있는 것처럼 괴산댐, 소양강댐 유역의 경우 평균 지표면 유출량이 50.0%를 넘는 것으로 나타났으며 화천댐 유역과 충주댐 유역은 평균 지표면 유출량이 50.0%보다 작고 기저유

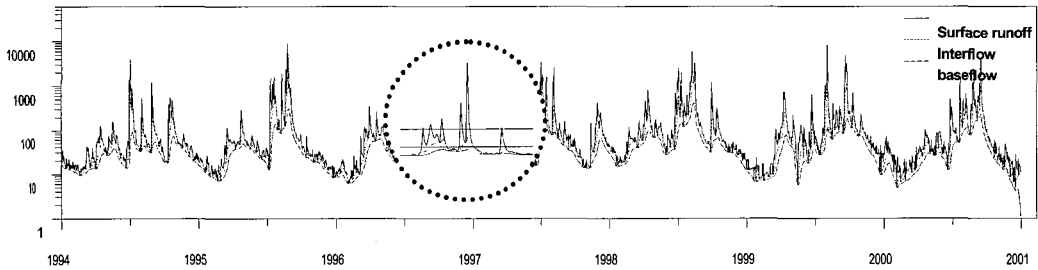
출량이 차지하는 비율이 다른 유역에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 한편 관측 수문곡선으로부터 분리한 성분별 유량과 앞에서 모의된 탱크모형의 성분별 유량과 비교한 결과, 각 유역별로 모의된 모형의 성분별 유출량이 실측치와 차이가 있음을 알 수 있다. 화천댐 유역은 지표면유출이 전체유량의 53.9%로 관측치 45.5%에 비해 크게 평가되었고 기저유출은 23.1%로 적게 모의되었다. 소양강댐 유역은 유출용적오차가 -0.58%로 총 유출량 측면에서는 우수하게 모의되었지만 유출성분별 유출량에서는 지표면유출량이 과다 산정되었고 상대적으로 기저유출량은 과소평가된 것을 알 수 있다. 충주댐 유역과 괴산댐 유역은 지표면유출량은 크게 중간유출량은 작게 모의된 것을 알 수 있다. 결론적으로 기존의 Powell 방법의 경우 총유출량은 비교적 우수하게 모의하지만 각 유출성분별 유출량에 대해서는 제대로 모의하지 못하는 것으로 판단된다.



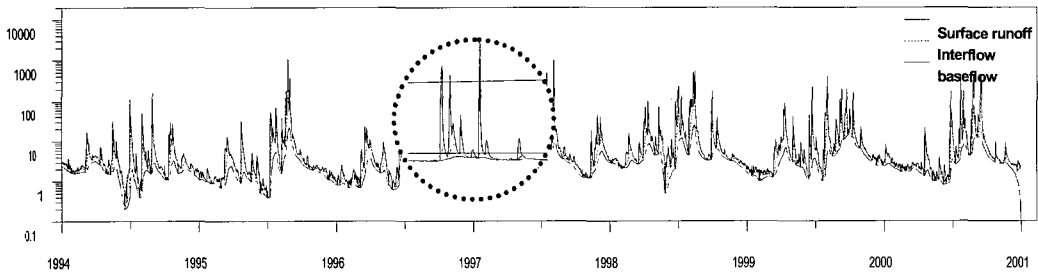
(a) 화천댐유역(1990년-2000년)



(b) 소양강댐유역(1990년-2000년)



(c) 충주댐유역(1994년-2000년)



(d) 과산댐유역(1994년-2000년)

그림 8. Digital filter 방법에 의한 관측 수문곡선 분리(매개변수 추정기간)

표 6. 댐 지점별 각 방법의 유출성분비율 비교

(단위 : %)

유역	구분	실측치	Powell 방법	유출성분을 고려한 방법
화천댐	지표면유출	45.5	53.9	48.4
	중간유출	25.4	23.0	25.0
	기저유출	29.1	23.1	26.6
소양강댐	지표면유출	52.1	58.0	51.1
	중간유출	25.1	22.9	20.9
	기저유출	22.8	19.1	28.0
충주댐	지표면유출	47.7	52.3	43.1
	중간유출	25.5	21.7	21.8
	기저유출	26.8	26.0	35.1
괴산댐	지표면유출	55.2	59.7	48.8
	중간유출	22.7	16.7	21.5
	기저유출	22.1	23.6	29.7

표 7. 유출성분을 고려하여 추정한 매개변수값

유역	매개변수											
	A ₁₁	A ₁₂	B ₁	A ₂	B ₂	A ₃	B ₃	A ₄	H ₁₁	H ₁₂	H ₂	H ₃
화천	0.371	0.096	0.097	0.262	0.0899	0.0177	0.0062	0.0018	54.5	21.6	10.2	11.4
소양	0.354	0.124	0.096	0.050	0.0578	0.0062	0.0571	0.0006	43.5	19.8	12.2	10.0
충주	0.370	0.103	0.089	0.160	0.1558	0.0091	0.0241	0.0006	56.8	33.8	5.6	10.0
괴산	0.532	0.110	0.165	0.076	0.0652	0.0056	0.0141	0.0005	43.5	15.4	15.3	8.1

표 8. 유출성분 고려시의 통계적 결과

통계치	유역	화천댐		소양강댐		충주댐		괴산댐	
		관측치	계산치	관측치	계산치	관측치	계산치	관측치	계산치
평균유출량(m ³ /sec)		89.6	87.9	74.9	74.2	153.0	153.9	13.9	14.2
최대유출량(m ³ /sec)		7279	7036	7063	4395	8776	5713	1059	743
최소유출량(m ³ /sec)		0.0	3.2	0.0	2.7	4.1	0.6	0.2	0.3
유출율(%)		64.3	63.1	68.0	67.5	59.0	59.3	52.4	53.7
유출용적(ton)		3.1E+10	3.1E+10	2.6E+10	2.6E+10	3.4E+10	3.4E+10	3.1E+9	3.1E+9
유출용적 오차(%)		-1.87		-0.91		1.61		2.45	
평균계급근오차(mm/day)		2.73		4.86		2.29		2.69	
상관계수		0.92		0.80		0.92		0.91	

4.2 유출성분을 고려한 매개변수 추정 및 검증

전술한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 각 유역의 유출성분을 고려하여 표 7과 같이 매개변수를 재추정하였다. 표 6에서 알 수 있듯이 유출성분을 고려하여 추정한 매개변수에 의한 유출모의는 단순히 Powell 방법에 의해 추정된 매개변수를 이용하여 유출을 모의했을 때 보다 정확하게 모의됨을 알 수 있다. 또한 표 8에 제시된 것처럼 평균제곱오차는 전 지점들에 대해서 감소해 좋은 결과를 나타냈으며, 유출용적오차는 소양댐, 괴산댐유역에서 수정하기 전보다 크게 나타났다. 화천댐은 오차가 줄어들었다. 그림 9는 유출성분을 고려한 매개변수를 이용하여 모의한 계산수문곡선과 관측수문곡선을 도시한 것이다.

표 7의 매개변수를 이용하여 검증기간에 대해서 검증을 실시하였다. 검증결과 표 9에 제시된 것처럼 화천댐유역은 상관계수가 0.65로 4개의 적용대상 유역 가운데 가장 부정확한 결과를 나타내었다. 화천댐 유역의 강우량과 댐유입량을 그래프로 도시하여 검토한 결과 강우량과 실측치가 일치하지 않는 부분이 많은 것으로 나타나므로 화천댐 유역의 경우 관측자료의 신뢰성이 다소 문제가 있다고 판단된다. 나머지 유역에 대해서는 산정된 평균제곱근오차들이 모두 5mm/day 이하로 모형의 매개변수가 정확하게 모의되었다고 판단할 수 있다. 상관계수도 화천댐유역을 제외하고는 0.72 이상의 값들을 보여 전체적인 상관성에서도 정도가 높게 모의되었다고 할 수 있다. 참고로 전체 자료기간에 대해서

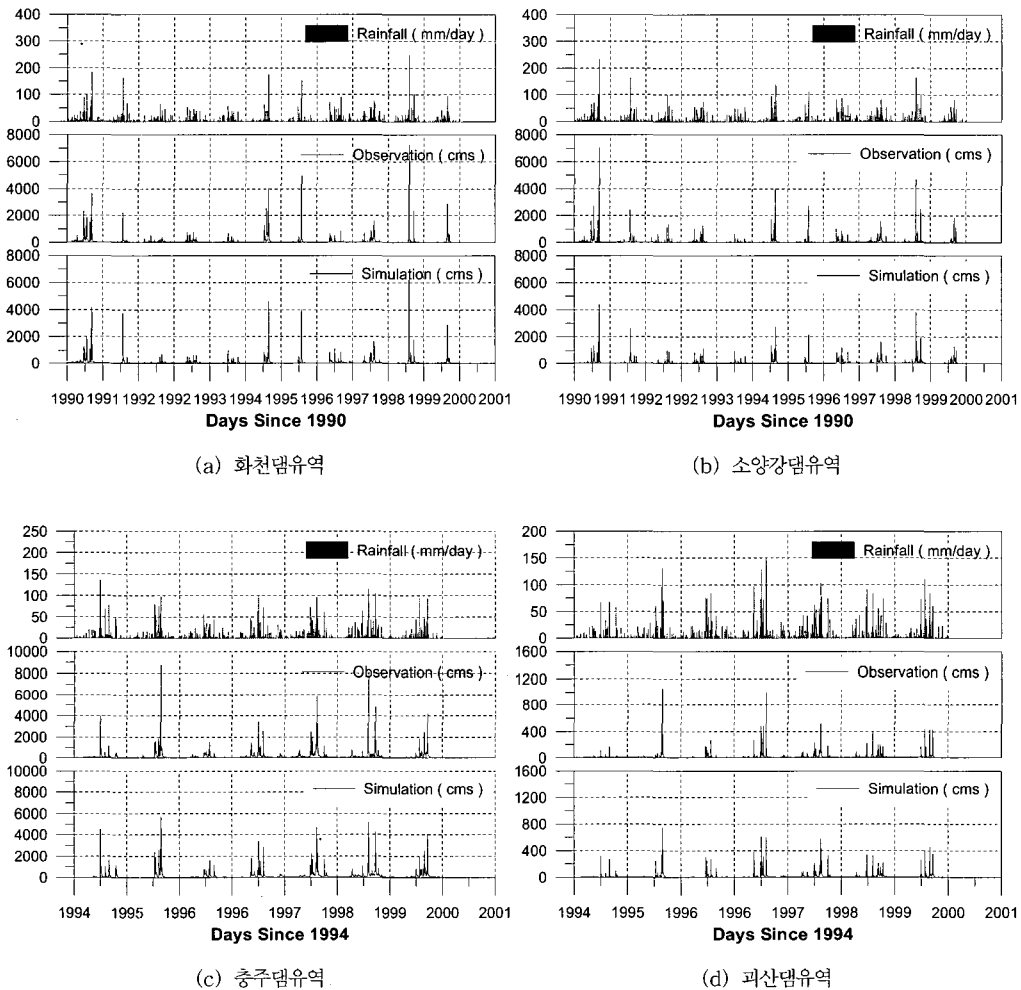


그림 9. 관측수문곡선과 모의수문곡선의 비교(계산기간, 유출성분 고려)

표 9. 유출성분을 고려한 매개변수 추정 전·후의 통계적 결과비교

구 분	매개변수 추정기간			검증기간			전체기간			
	유출 용적 오차 (%)	평균 제공근 오차 (mm/day)	상관 계수	유출 용적 오차 (%)	평균 제공근 오차 (mm/day)	상관 계수	유출 용적 오차 (%)	평균 제공근 오차 (mm/day)	상관 계수	
화천	전	1.98	2.78	0.92	-21.5	4.60	0.65	-16.22	4.12	0.76
	후	-1.87	2.73	0.92	-21.5	4.58	0.65	-15.98	4.08	0.76
소양	전	-0.58	4.90	0.79	-11.1	4.03	0.79	-2.52	4.40	0.79
	후	-0.91	4.86	0.80	-12.5	3.99	0.80	-3.46	4.36	0.80
충주	전	-1.54	2.32	0.92	-9.1	3.34	0.88	2.11	2.89	0.90
	후	1.61	2.29	0.92	-4.6	3.38	0.88	2.07	2.92	0.90
괴산	전	-1.59	2.71	0.91	-12.0	4.08	0.72	-0.11	3.64	0.80
	후	2.45	2.69	0.91	-11.3	4.08	0.72	-0.16	3.64	0.80

표 10. 유출성분을 고려한 전체 자료 기간에 대한 성분별 모의결과

(단위 : %)

유역	구분	실측치	계산치
화천댐	지표면유출	46.7	48.4
	중간유출	26.6	25.0
	기저유출	28.7	26.6
소양강댐	지표면유출	50.9	51.1
	중간유출	25.7	20.9
	기저유출	23.4	28.0
충주댐	지표면유출	47.9	43.1
	중간유출	24.8	21.8
	기저유출	27.3	35.1
괴산댐	지표면유출	54.9	48.8
	중간유출	23.7	21.5
	기저유출	21.4	29.7

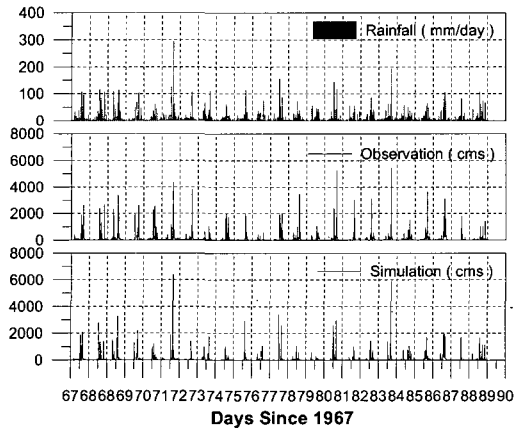
모형결과의 통계적 특성치를 산정해 본 결과 검증기간과 동일한 결론을 도출할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 유출성분을 고려한 매개변수 추정방법은 기존의 Powell 방법에 의한 단순 매개변수 추정기법보다 더 합리적이고 객관적인 매개변수 추정방법이라 판단된다.

4.3 미계측유역의 유출성분 모의능력의 검토

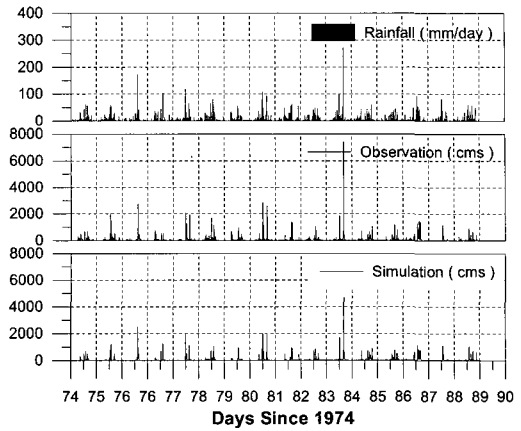
통상 미계측 유역의 유량모의는 합성단위도법과 같이 유역특성인자를 이용하여 유량을 간접적으로 산정하거나, 인접 계측유역에서 산정된 매개변수를 미계측유역의 매개변수와 동일하다고 가정, 즉 유역의 수문학적

특성이 동일하다는 가정하에서 유출모형을 이용하여 모의한다. 이는 미계측 유역에서의 유출특성을 파악하는 방법을 제안하는 것으로 인근의 지형학적 특성이 비슷한 계측지점에서 성분별 유출량을 고려한 매개변수를 추정하여 미계측유역에서 성분별 유출량을 산정함으로써 이수계획 수립시 필요한 갈수유출량 산정에 중요한 자료로서 사용될 수 있을 것이다.

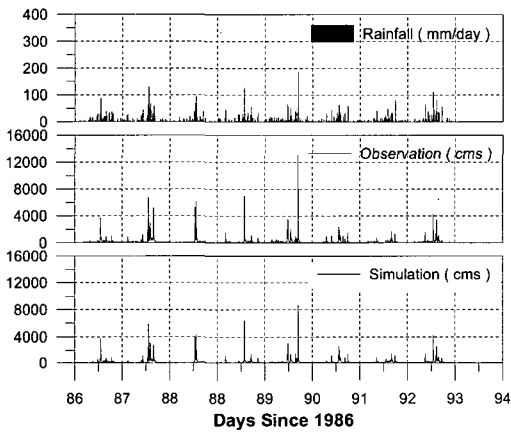
본 연구에서는 계측유역에서 추정된 매개변수를 미계측유역의 매개변수로 가정하여 유출을 모의할 경우 정확도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 화천댐유역에서 추정된 매개변수를 춘천댐유역의 매개변수로 가정하여 그림 11과 같이 1990~2000년의 유출량을 모의하



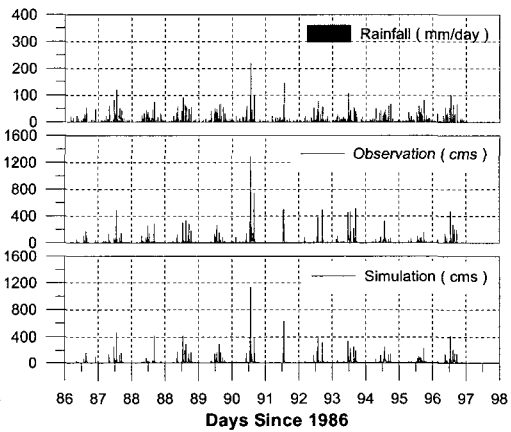
(a) 화천댐유역



(b) 소양강댐유역



(c) 충주댐유역



(d) 괴산댐유역

그림 10. 관측수문곡선과 모의수문곡선의 비교(검증기간, 유출성분 고려)

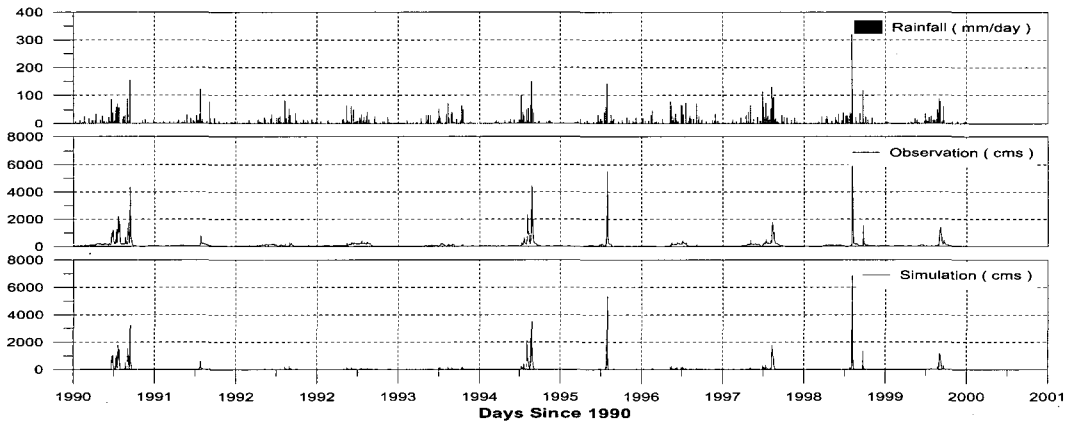


그림 11. 춘천댐 유역 모의 결과

었다. 모형계산 및 비교검증의 자료는 강수량, 춘천댐 유입량 및 화천댐 방류량 자료를 이용하였다. 모의결과 상관계수가 0.97, 평균제곱근오차 3.28mm/day이었으며 관측수문곡선을 분리한 결과 지표면, 중간, 기저유출이 각각 39, 24, 37%로 나타났고 모의치는 각각 46, 23, 31%로 계산되었다. 정확하게 일치하지는 않았지만 춘천댐유역의 매개변수를 직접 추정한 것이 아니라면 것과 화천댐유역의 자료 불확실을 고려한다면 비교적 유사하게 모의되었다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 탱크모형의 매개변수를 추정하는데 있어서 유역고유의 유출특성을 모의할 수 있는 방법을 제시하였다. Digital filter 방법을 이용하여 4개 댐지점의 관측유량을 지표, 중간, 기저유출로 분리한 후, 탱크모형에 의해 모의된 지표유출량, 중간유출량 및 기저유출량과 비교·검토하였다.

한강유역의 4개 댐지점을 선정 실측수문곡선을 각 유출 성분별로 분리하여 유출성분비를 확인하였다. 그리고 자동추적법에 의해 추정된 모형의 매개변수에 의한 모의 성분별 유량과 비교·검토 후 유역의 성분별 유출량을 고려해서 매개변수를 추정하였다. 결과적으로 자동추적법은 총유출량을 모의하는 매개변수는 추정하지만 유출성분을 모의하는 매개변수는 모의하지 못하는 것으로 확인되었다. 자동추적방법은 탱크모형 매개변수의 물리적 의미를 유지한 상태에서 관측유량과 계산유량의 차이가 최소가 되는 매개변수를 추정하기보다는 단지 수학적으로 최소값을 추적하는 한계가 있었다. 결과적으로 성분별 유출량을 고려하여 매개변수를 추정할 결과 더 정확한 유출해석을 할 수 있었다. 따라서 자동추적법으로 탱크모형의 매개변수를 추정할 때는 본 연구에서 제시한 유출성분을 고려한 매개변수의 추정이 이루어져야 하며, 본 연구에서 제안한 매개변수 추정방법은 모형해석의 난제인 유역 고유의 매개변수 추정에 더 근접하는 효율적인 방법이라고 판단된다. 또한 춘천댐유역을 미계측유역이라 가정하고 화천댐 유역의 매개변수를 사용하여 유출을 모의한 후, 실제 관측치와 비교한 결과 정확한 값은 아니지만 유역의 수문학적 특성이 유사한 유역의 갈수특성을 어느 정도는 모의할 수 있다고 판단되었다. 이 방법은 더 많은 지점들에 대한 적용을 통해 검증이 이루어져야 하지만 미계측 유역의 성분별 유출량을 추정하는데 있어서 하나의 방향을 제시할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1997). **수자원관리기법개발 연구조사**.
 건설교통부, 한국수자원공사, 한국건설기술연구원 (1999). **수자원 계획의 최적화 연구(III)**.
 김현영, 박승우 (1986). "유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화." **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제28권, 제2호, pp. 42-52.
 박승우 (1993). "TANK 모형 셀프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정." **한국수문학학회지**, 한국수문학학회, 제26권, 제3호, pp. 47-61.
 배덕효, 허준행, 정준석 (1999). "비선형 연속 유출모형의 매개변수 자동추정에 관한 연구." **대한토목학회 논문집**, 제19권, 제II-2호, pp. 139-148.
 심순보, 김선구, 고석구 (1992). "최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정." **대한토목학회논문집**, 제12권, 제3호, pp. 127-137.
 신성철, 강경석, 서병하 (2001). "Tank Model의 매개변수 최적화에 관한 연구." **한국수자원학회 학술발표회 논문집(1)**, pp. 158-163.
 이동률, 김형섭 (1999). "낙동강 갈수관리를 위한 의사결정 지원시스템." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제III-4호, pp. 455-465.
 이상호 (1998). "탱크모형의 유출공 승수 변화를 고려한 홍수모의." **한국수자원학회지**, 제31권, 제1호, pp. 3-12.
 이관수, 이영석, 정일광 (1995). "탱크모형의 매개변수추정을 위한 상태공간모형의 결정." **한국수자원학회지**, 제28권, 제2호, pp. 125-135.
 Abu El-Nasr, A., Willems, P., Arnold, J., Feyen, J.(2002). "Comparison of two methods to split the total discharge in its components." *Hydroinformatics 2002*, pp. 253-258.
 Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R.S. and Bernhardt, G. (1995). "Automated base flow separation and recession analysis techniques." *Groundwater*, Vol. 33(6), pp. 1010-1018.
 Kueter, J.L. and J.H. Mize. (1973). *Optimization*

Techniques with Fortran. McGraw-Hill Company.

Nathan, R.J. and McMahon, T.A. (1990). "Evaluation of automated techniques for base flow and

recession analysis." *Water Resour. Res.*, 26(7), 1465-1473.

(논문번호:02-89/접수:2002.11.14/심사완료:2003.04.18)