

漢江水系 다목적댐 下流 日 流出 模擬 研究

A Research on the Daily Runoff Simulation for the Downstream Region of Multipurpose Dams in the Han River

이 상 호* / 김 영 성** / 신 용 노***

Lee, Sang Ho / Kim, Young Seong / Shin, Yong Lo

Abstract

A daily runoff system was constructed to support decision making for water use in the downstream region of multipurpose dams in the Han River. The daily runoff system used the modified model from NWSRFS by Tabios III et al.(1986), and potential evapotranspiration was computed from Penman equation. DWOPER was used for channel routing. While the North Han River is the main river reach in the channel routing system, the South Han River and the Soyang River became tributaries. The rainfall-runoff model was calibrated and verified for five subbasins. Daily runoffs were simulated with the hydrometeorological data in 1986 and 1990. The simulations were performed from April to November, and the sum of computed discharges for seven or thirty days were compared with actual releases of the downstream dams. It showed the average absolute errors of 8.7~31.6%. The sum of total discharges were 10% or less. While stage errors were produced by 0.5 m or less at Yoju station in the case of simulation from April to August in 1986, the errors kept under 0.2 m since September. In the simulation for 1990, we compared two simulation results. One is produced from real internal and downstream boundary conditions and the other is one from internal and downstream boundary conditions fixed arbitrarily. The two cases showed similar results.

Keywords: daily runoff, the Han river, DWOPER, Penman equation

요 지

한강유역 다목적 댐의 하류지역에 대한 이수목적의 방류 의사결정 능력을 향상시키고자 일 단위 유역 유출체계를 구성하였다. 강우-유출 연속모의 모형은 NWSRFS의 유역 요소를 Tabios III 등이 수정한 모형(1986)을 사용하였고, 잠재 증발산량은 Penman 식으로 산정하였다. 하도추적 모형은 DWOPER를 사용하였다. 하도추적 체계는 북한강을 본류구간으로 하고 소양강과 남한강이 합류되는 형상으로 구성하였다. 강우-유출 모형의 보정 및 검증은 5개 소유역에 대하여 수행하였다. 구성된 체계로써 '86년과 '90년의 유출을 모의하였다. 4월부터 11월까지 모의한 결과, 하류 댐지점들의 7일 또는 30일간 계산 유량합은 방류실적과 8.7~31.6%의 평균 절대오차를 보였다. 총 방류량을 총 계산 유량값과 비교할 때, 10% 이내의 절대오차를 보였다. 1986년의 경우에, 여주 수위관측소에서는 4월~8월 사이에 약 0.5 m의 수위계산 오차를 보였으나, 9월 이후에는 대부분 0.2 m 이하의 오차를 보였다. 1990년의 경우에, 미래 貯水位를 모르는 상태에서 현재 저수위를 하류 및 내부경계조건으로 고정한 모형수행 결과, 실제 貯水位를 사용한 경우와 근사한 결과를 보였다.

핵심용어: 일유출, 한강, DWOPER, Penman 식

- * 부경대학교 토목공학과 전임강사
- ** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원
- *** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

1. 서 론

1.1 연구목적 및 배경

한강 유역의 상류에 건설되어 운영되고 있는 충주댐과 소양강댐은 다목적 댐으로서 여러 가지 기능을 가지고 있다. 우선 서울을 중심으로한 수도권에 대하여 홍수 피해를 저감시키는 기능을 가지고 있다. 또한 홍수기에 저류한 물을 바탕으로 역시 수도권 지역에서 소요되는 상수도 원수를 공급하는 역할을 수행한다. 그리고 두 다목적 댐의 방류는 하류에 위치한 의암댐, 청평댐, 팔당댐 등 한국전력공사 관할 댐 발전에 직접적인 영향을 준다.

위와 같은 이·치수 목적의 다목적 댐 운영에 필수적으로 정의되어야 할 변수는 하천의 유출량이다. 다목적 댐의 하류 지역에 국한하면, 청평, 여주, 팔당 등의 주요 지점 하천 유출량은 다목적 댐의 방류량과 주변 지류로부터의 유출량이 합해져서 流下하여 결정된다. 현재 한강유역의 유출모형으로서 운영되고 있는 것은 저류함수법을 근간으로 한 홍수 유출모형이다. 이는 원격 측정설비 등의 홍수 예경보 설비와 함께 한강 홍수 통제소에서 운영되고 있으며 여름철 홍수 발생시 사용되고 있다. 한편 이수 목적에 주로 사용할 수 있는 低水 유출모형은 아직 한강유역에 대하여 제대로 구축되어 있지는 않으나, 한국건설기술 연구원에서 수행하고 있는 '장기 물 공급 전망은 인도교 지점에 대한 다중감수 수문모형을 사용하고 있다. 이러한 모형들은 나름대로의 기능을 발휘하고 있지만, 향후 어느 시점에서는 보다 개선된 유출모형을 구성하는 작업이 수행될 수 있으므로, 여러 가지 모형을 적용하는 시도가 꾸준히 지속될 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 노력의 한 가지 시도로서, 한강 수계 다목적 댐 하류의 유역 유출을 모의하고자 한다. 유출 모형의 성격은 홍수나 低水を 구분하지 않고 모두 적용될 수 있도록 하였다. 그러나 한강유역에 대해서는 일 단위의 低水流出 모형에 대한 연구가 치수 모형에 비하여 상대적으로 적었던 점과, 근래 다목적 댐의 관리에서 용수 공급 측면이 점점 중요해지는 점을 감안하여 일 단위의 유출 모의만을 연구하였다.

1.2 유역 유출 모형 및 연구 범위

유역 유출이란 보통 유역 면적이 큰 경우에 특정 지점의 유출을 말하며, 소유역의 강우-유출과는 수문학적 과정이나 규모 면에서 대비된다. 유역의 규모가 큰 경

우에는, 유출 과정이 지표면 흐름(overland flow)과 하도 흐름, 저수지를 통한 흐름 등으로 복잡하게 이루어진다. 그러므로 유역 유출 모형은 강우-유출 모형, 하도추적 모형, 저수지 운영 모형 등의 여러 부속 모형으로 구성될 수 있다.

대표적인 유역 유출 모형으로서 '50년대부터 현재까지 사용되고 있는 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)을 들 수 있다. SSARR의 기능은 降雨나 融雪에 의한 유역 유출을 모의하는 것으로서 토양 함수 상태, 증발산 손실, 지표면 유출, 중간 유출, 기저유출 등을 고려한다. 그러므로 홍수나 저수 유출에 모두 적용될 수 있다. 이 모형은 일반적인 지류방정식을 추적(routing)의 기본식으로 사용하며, 하도추적에는 비선형 효과를 도입하였다. SSARR은 강우-유출 과정과 하도추적, 저수지 운영 등의 부속 성분을 포함하고 있다. SSARR가 적용된 예는 Mekong 강 유역의 Se Bang Hieng 강에 대한 사례를 들 수 있으며(Rockwood, 1969) 우리나라에서는 낙동강 유역(이길성, 1996)에 적용된 최근 예도 있다. 영국의 예로는 O'Connell 등(1986)이 구성한 실시간 유출 예측모형을 들 수 있다. 이는 1816 km²의 Dee 강 유역에 적용된 것으로서 홍수경보와 저수유출 예측 및 관리에 모두 사용될 수 있다. 사용된 강우-유출 모형은 저류방정식의 유형이고 하도추적 모형은 가변 매개변수 확산(variable parameter diffusion) 모형이다.

미국 National Weather Service는 여러 지역의 하천 유출 예측센터(River Forecast Center)를 중심으로 하천의 유출예측 정보를 대중들에게 제공하는 기능을 수행하고 있으며, National Weather Service River Forecast System(NWSRFS)이 사용되고 있다. NWSRFS는 Sacramento 모형(Burnash et al. 1973)의 단위도 추적부분을 수정하여 처음 명명된 것이다. NWSRFS는 그 후 여러 가지 부속모형이 추가되거나 수정되어 실제 유출 예측 업무에 사용되어 왔다. 현재의 NWSRFS는 모형 보정체계(Calibration System), 예측 체계(Operational Forecast System), 장기간(몇 주 또는 몇 개월)의 확률적인 예측 체계(Extended Streamflow Prediction)로 크게 구분된다.

홍수관리용 유출 모형으로는 미국의 BRASS(Basin Runoff and Streamflow Simulation; McMahon 등, 1984) 모형과 Unver 등(1987)이 구성한 모형이 있다. BRASS 모형은 Savannah 강 저수지 체계의 운영에 대한 의사결정 지원수단으로 사용하기 위해서

개발되었다. 이 모형은 단위도를 강우-유출 모형으로 사용하고 DWOPER를 하도추적 모형으로 사용하였다. Unver 등(1987)의 모형은 Lower Colorado River Authority (LCRA)의 유역 홍수관리에 사용하기 위해서 개발되었다. LCRA의 관할 유역은 Buchanan 湖의 분수령부터 멕시코 灣까지로 하천의 길이가 712 km에 달하는 Colorado 강의 하류 유역이다. 이 모형에서도 하도추적에는 DWOPER를 사용하였다. 그 이유는 Colorado 강 본류에 7개의 대소규모 댐들이 貯水池列(cascade of reservoirs)을 이루고 있기 때문이다. 그리고 비록 유역면적이 472.5 km²로 비교적 작다고 할 지라도, 위천 IHP 시험유역에 대하여 전달함수형 강우-유출 모형과 DWOPER를 사용하여 홍수 유출을 모의한 지홍기와 박기호 (1994)의 연구 사례가 있다.

위에서 열거한 유역 유출 모형들의 성격을 개괄적으로 분류해보면, 우선 여러 개의 저수지가 貯水池列을 이루고 있는 곳에서는 하도추적 모형으로서 부정류 모형을 사용하였다. 또한 영국의 예와 SSARR의 경우를 보면, 하도추적에 있어서 단순화된 식도 여전히 사용되고 있음을 알 수 있다.

한강 유역 다목적 댐 하류의 유출 모의에는 기존의 모형을 사용하였다. 우선 상업목적으로 제공되거나 국내에서 사용된 적이 있어서 쉽게 획득 가능한 유출 모의 프로그램들을 수집한 후, 모형을 선택하였다. 이 때 선정된 모형이 홍수나 저수에 모두 사용될 수 있도록 하여 본 논문에서 다루지 못한 홍수모의에 쉽게 이용될 수 있도록 하였다. 먼저 SSARR은 그 자체로서 대규모 유역의 유출 모의에 이용될 수 있다. 모의 시간간격도 0.1~24 시간이므로 홍수와 저수에 모두 적용 가능하다. 그런데 SSARR의 본류구간 하도추적 매개변수 추정에는, 여러 하천지점에서 양질의 유량자료가 요구되는데 우리나라 하천 유출 자료의 신뢰성이 떨어지는 점을 감안할 때 적극적으로 채택할 필요성을 가지기 어려웠다. 그리고 북한강의 댐지점 모의에 필요한 입력 자료 구성도 어려움이 예상되었다. 그래서 SSARR의 사용은 배제되었다.

본 연구에서는 하도추적 모형과 유역 강우-유출 모형을 조합하여 유출을 모의하였다. 하도 추적모형으로는 DWOPER(Fread, 1987), UNET(Barkau, 1993) 등의 기존 부정류 프로그램을 쉽게 구할 수 있고, Muskingum-Cunge, 확산 근사법, 운동과 추적법 등의 근사 해석 프로그램을 작성하여 사용할 수도 있다. 위의 모형 또는 방법 중에서 여전히 어려

운 점은 북한강의 댐들을 처리하는 것에 있다. 북한강 수계에 대한 근사해법 적용은 다른 연구를 통하여 분석할 필요가 있으나 본 연구에서는 댐의 처리에 적합한 부정류 모형을 선택하였으며, 국내에서 비교적 많이 사용된 DWOPER를 사용하였다. 하도추적 모형에 연결하여 사용할 유역의 강우-유출 모형으로는 HSPF(Johanson과 Imhoff, 1984)와 NWSRFS, 탱크모형 등의 적용 가능성을 고려하였다. 그런데 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency)로부터 구입한 HSPF는 강우-유출 모형뿐만 아니라 수질인자를 모의하기 위한 여러 수질 모형을 결합한 것으로서 매우 복잡한 복합 모형이었다. 그리고 FORTRAN 원시 프로그램 중에서 강우-유출 모형만을 분리하여 사용하기가 매우 어려웠다. 따라서 HSPF의 사용은 배제하였다. NWSRFS는 미국 NWS에 문의한 결과, HOMS 미국 지부를 통해 구입 가능하였지만 비용이 크게 소요되어 적용대상에서 제외하였다. 그 대신 NWSRFS의 일부 요소와 HEC-1의 일부를 추출하여 작성한 Tabios III등의 모형(1986)을 수집하게 되어 이를 이용하였다. 이 모형도 여러 부속 모형의 복합모형이다. 탱크 모형은 별도의 부속모형이 없는 단일 모형으로서, 기능이나 복잡성 측면에서 위의 두 모형과 단순히 비교하기는 어렵다. 그렇지만 유역의 강우-유출 모의 기능만을 생각한다면 유용한 모형중의 하나이다. 탱크 모형이 단순성에도 불구하고 배제된 것은 약 20여개에 달하는 매개변수의 추정에 어려움이 예상되었기 때문이다. Tabios III등의 수정모형은 도양함수상태 계산에 관련된 16개 매개변수의 자동추정 부속모형을 포함하고 있으므로 사용자에게 보다 편리하다. 여러 가지 대안들에 대한 사전적용이 이루어지지 않았으나, 모형의 가용성과 편리성, 홍수 모의로의 이용 가능성 등의 기준아래서 남북한강 본류 구간의 하도추적 모형은 DWOPER로 선택하였고 유역의 강우-유출 모의는 Tabios III등의 모형을 사용하였다.

유출 모의 간격은 日單位로 하였다. 融雪 流出은 별도의 부속모형과 많은 입력 자료를 요구하므로 본 연구 범위에서 제외하였다. 그리고 12월부터 3월의 동절기에 기록된 수위자료들 중에는 환산 유량이 음수가 계산되는 등 이용하기 어려운 경우도 많았으므로, 유출 모의 대상 기간을 4월부터 11월로 하였다. 유역 유출모의의 검증은, 1986년과 1990년의 수문 기상자료를 이용하였다.

2. 한강 수계 다목적댐 하류 유출 모형의 구성

2.1 강우-유출 모형의 개요

Tabios III 등의 모형은 크게 토양 함수 상태 계산 (Sacramento Soil Moisture Accounting; SAC-SMA) 모형과 흐름에 대한 추적모형으로 구분된다. SAC-SMA 모형은 流域을 上層部(upper zone)와 下層部(lower zone)로 구분한다. 上層部는 上部土壤層과 遮斷貯留池를 나타내고, 下層部는 土壤水分體나 地下水體를 표시한다. 모형의 구조는 Tabios III 등(1986)의 보고서에 자세히 기술되어 있다.

강우-유출 모형의 추적방법은, 運動波(kinematic wave)로서 流域의 斜面과 河道를 추적할 수도 있고, 單位圖-Muskingum 방법을 조합하여 추적할 수도 있다. 본 연구에서는 운동과 추적법을 사용했으며, 이와 관련된 지형특성 매개변수들은 지형도 및 수치고도 자료로부터 추출하였다.

2.2 潛在蒸發散量 산정 모형

잠재 증발산량 산정에는 Penman 식(Gupta, 1989)을 사용하였다. 관계식은 다음과 같다.

$$H = R_A(1 - r)(0.18 + 0.55n/N) - \sigma T^4(0.56 - 0.092\sqrt{e_d})(0.10 + 0.90n/N)$$

$$E_0 = 0.35(e_a - e_d)(1 + 0.0098u_2)$$

$$E_t = \frac{\Delta H + 0.27E_0}{\Delta + 0.27}$$

여기서, H = 표면의 일 열수지, mm/day

R_A = 월평균 태양복사, mm/day

γ = 표면 반사율, albedo

n = 일조시간, hr

N = 가조시간(일출에서 일몰까지의 시간), hr

T = 일평균 절대온도, °K

t = 일평균 기온(°C)

σ = 볼츠만 상수 = 201.6×10^{-12} cm day⁻¹ K⁻⁴

e_a = 포화증기압, mm/Hg

$$= \{ \exp(54.879819 - 6790.4985/T - 5.02808 \log_e T) \} \times 0.7501$$

$$\Delta = \frac{de_a}{dT} = \frac{e_a}{T} \left(\frac{6790.498}{T} - 5.02808 \right) \times \frac{5}{9}$$

e_d = 증기압(= $e_a \times$ 상대습도)

w = 지상 2m의 평균 풍속, mi/day = $u \times \log(6.6/h)$

u_t = 지상에서 h ft에서 측정된 평균풍속, mi/day

E_0 = 증발량, mm/day

E_t = 잠재 증발산량, mm/day

Penman식은 통상 측정되고 있는 기상 자료를 이용하므로 소요자료가 많은 반면, 현실적인 방법이다. 잠재증발산량 계산은 日照時間, 日照時間, 평균 기온, 일평균 풍속, 풍속계의 지상높이, 상대습도 등의 자료가 필요하다.

2.3 부정류 하도추적 모형

사용된 DWOPER는 다음과 같은 지배방정식의 해를 구한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA(S_0 + S_f + S_c) - qV_x + WB = 0 \quad (7)$$

여기서 Q 는 유량, A 는 단면적, q 는 橫流入量, x 는 하도를 따른 거리, t 는 시간, g 는 중력가속도, S_0 는 河床傾斜, S_f 는 摩擦係數(friction slope)項이다. A_0 는 유속이 매우 작은 非有效 단면적, V_x 는 橫流入量의 x 방향 유속, W_f 는 바람의 영향을 고려하는 항, B 는 수면폭이며 S_c 는 斷面의 擴大, 縮小에 따르는 損失係數項이다.

3. 한강 유역현황 및 강우-유출 모형의

입력자료 형성

3.1 대상유역의 현황

한강은 유역면적이 26,220km²이고, 유로연장이 467.7km²이다. 현재 한강유역에는 한국수자원공사에서 관리하는 소양강 및 충주 다목적 댐이 있으며, 한국전력공사에서 관리하고 있는 발전용 댐으로서 북한강 수계내에 화천, 춘천, 의암, 청평댐이 循序貯水池列을 이루고 있다. 또한 남한강의 지류인 달천유역에는 괴산댐이 있고, 남·북한강 합류점 직하류에는 팔당댐이 있으며, 이들도 한전에서 관리하고 있다. 본 연구의 대상지역은 충주댐, 소양강댐, 화천댐 하류부터 남북한강 합류점 직하류에 위치한 팔당댐까지이다.

다목적 댐 하류의 유역 유출체계 구성을 위한 소유역 분할은 지류에 위치한 수위관측소와 지표 흐름 평면의 형상을 고려하여 결정하였다. 즉 수위 관측소가 설치된 곳은 강우-유출 모형을 보정할 수 있으므로 소유역의 경계로서 선정하였다.

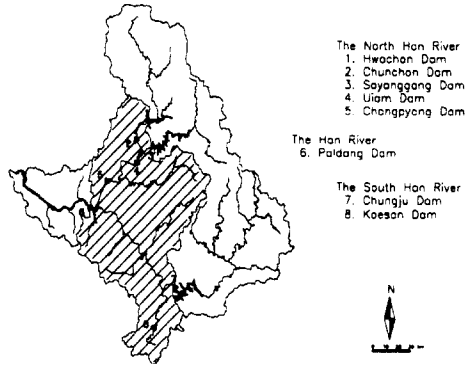


그림 1. 한강 유역 및 연구대상 유역

그리고 Tabios III 등의 모형에서 사용하는 유역의 형상은, 책을 펴놓은 것과 같이 가운데 하도가 있고 양쪽에 지표 흐름 평면이 있는 단순화된 형태이다. 그러므로 소유역을 분할할 때 가급적이면 위와 같은 형상이 되도록 노력하였다. 분할된 소유역은 45개(그림 2)로 남한강유역은 24개, 북한강유역은 18개, 팔당호로 유입하는 경안천은 3개이다.



그림 2. 소유역분할 및 유역면적

3.2 강우-유출 모형에 대한 소요 입력자료 형성

3.2.1 유역 지형인자 추출

흐름에 대한 추적모형의 기능은 유역 또는 하도 유입량을 소유역 출구의 유출로 모의하는 것이다. Tabios III 등의 모형에서는 유역면적, 유역사면 경사, 지표 흐름 평면의 길이, 하도경사, 하도폭 등의 지형인자들이 소요된다.

소유역 면적은, 1:50,000 지형도를 이용하여 유역을 분할한 후, Auto CAD 파일(file)로 digitizing한 다음, ARC/INFO를 이용하여 추출하였다(그림 2). 소유역에 대한 斜面傾斜率은 3"간격의 수치고도 자료와 지형 정보 체계를 구비한 한국과학기술연구원 시스템공학연구소에 의뢰하여 구하였다(그림 3). 河道傾斜率은 유역의 응답시간(response time)을 고려한 등가 경사 S (equivalent slope)를 이용하였다(Ponce, 1989).

$$S = [\sum L_i / \sum (L_i / S_i^{1/2})]^2 \quad (8)$$

위의 경사를 산정하려면 하도를 여러 개의 구간으로 분할하고, 각각에 대하여 구간 하도 길이 L_i 와 구간 하도 경사 S_i 를 구해야 하는데, 이는 지형도를 이용하여 산정하였다. 운동과 추적법에서는 河道幅의 대표값을 필요로 한다. 다목적 댐 하류에서 팔당댐 사이에 위치

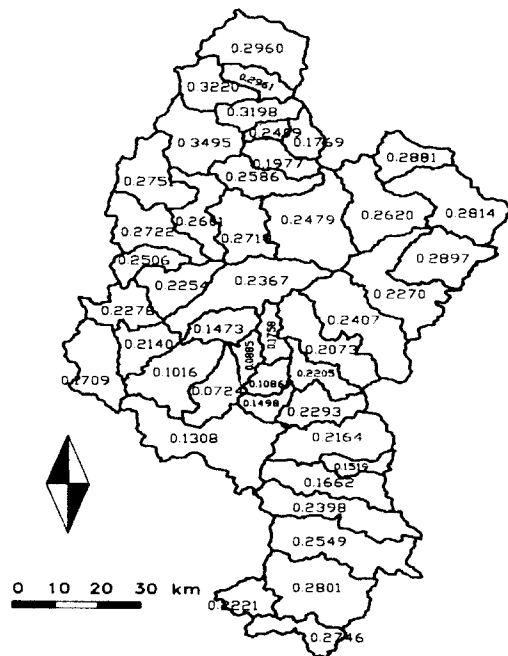


그림 3. 유역 사면 경사

한 지류에는 하천 중 / 횡단 측량이 수행되지 않은 곳이 많다. 그런데 본 과업 기간 중에 이를 직접 측량하지는 못하였으나 '93년에 소양강댐 상류의 수리학적 홍수추적 모형을 개발하면서 인북천, 내린천, 그 외의 여러 小支流 등 16곳에 대하여 단면 형상을 측량한 자료로부터 작성한 식을 이용하였다(GIS(지리정보 시스템)를 이용한 수자원 관리 및 계획에 관한 연구, 1993).

$$BW = 1.033 \times CL + 13.864 \quad (9)$$

여기서, $BW(m)$ 는 바다폭이며 $CL(km)$ 은 발원지로부터의 거리이다. 사다리꼴 단면의 측면 경사는 2.3을 사용하였다.

3.2.2 수문기상 자료 및 댐 자료

유출 모형의 적용 기간은 동일한 기간에 수문자료가 존재해야 하는 점을 고려하여, 1986년 이후만을 대상으로 하였다. 사용된 원격측정(telemetry) 우량 관측소 자료는 총 30개이다. 소유역별 면적 평균 강우량 계산에는 Thiessen 계수를 사용하였으며 계수산정을 위한 면적 계산에도 PC ARC/INFO가 이용되었다.

하천 유출자료는 연속 관측된 수위자료와 간헐적 측정에 의해 작성된 수위-유량식을 이용하였다. 우량 및 수위자료는 한국건설기술연구원의 수문 데이터베이스에서 제공받아 사용하였다.

잠재증발산량은 측후소의 증발량에 증발계수를 곱하여 추정하는 방법도 있으나, 우리나라에는 증발계수가 제대로 추정되어 있지 못하므로, 이론적 계산식인 Penman식을 적용하여 산정하였다. Penman식을 이용하여 잠재 증발산량을 산정하는데 필요한 자료 중에서 일 평균기온, 상대습도, 일조시간, 가조시간은 한국수자원공사 수문정보시스템(KOHIS)의 자료를 이용하였으며 평균풍속은 기상청 자료를 사용하였다. albedo(= γ)는 초지에 해당하는 0.25를 이용하였다.

4. 日單位 강우-유출 모형 적용

4.1 대상지류 선정 및 수위-유량식 선정

한강 유역에는, 한강 홍수통제소에서 관리하고 있는 자기 수위관측소가 26개, 원격측정 수위 관측소가 21개가 있다. '95년 현재 충주 및 소양강 댐 하류에서 팔당 댐 상류의 지류에 위치한 원격수위관측소는 11개가 있다. 이들 중 수위-유량 관측 기록을 보유한 관측소는 경안, 서면, 청미, 문막, 홍천, 간현 및 횡성 등 7 개소

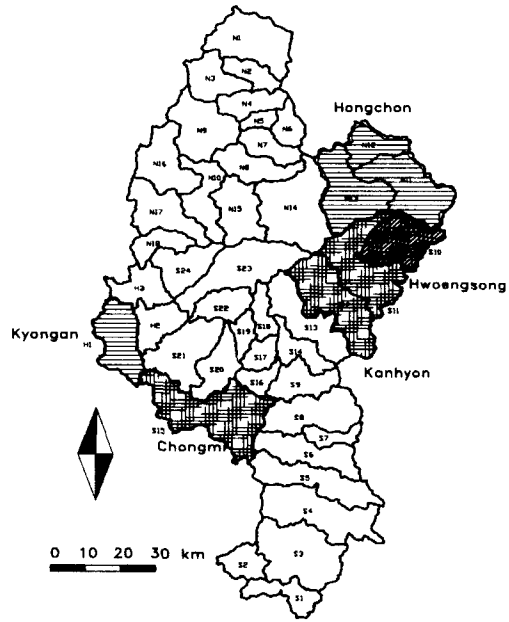


그림 4. 강우 유출 모형 보정 및 검증유역

가 있으나, 문막, 서면 관측소는 잦은 하상 변동과 수위 관측 기록의 일관성 결여로 환산된 유출량을 신뢰할 수 없어서 사용하지 못하였다. 나머지 5개 수위관측소의 수위-유량식은 강우-유출 모형 보정에 앞서 다소 수정하였다(이상호 등, 1995).

4.2 토양 함수상태 계산 모형의 매개변수 추정 및 모형검증

Tabios III 등의 모형에서는 총 22개의 매개변수를 결정하여야 한다. 이 중 6개는 초기 상태를 나타내주는 것으로 시산에 의하여 결정하였다. 나머지 16개의 매개변수 추정은 수동추정과 자동추정을 선택적으로 사용할 수 있는데, 수동추정은 유량 수문곡선을 분석하여 추정하며, 자동추정은 제약 Rosenbrok 알고리즘을 사용한다. 본 연구에서는 자동추정 기법을 사용하였다. 강우-유출 모형의 매개변수를 추정한 5개 유역(그림 4) 중에서, 지면 제약상 홍천 수위관측소에 대해서만 매개변수 추정 및 모형검증 결과를 그림 5, 6에 표시하였다.

5. 부정류 하도추적 체계 구성 및 입력자료 형성

5.1 입력 단면자료 작성

DWOPER 모형은 하천 단면 형상에 대한 입력자료로서 수위별 수면폭 자료를 필요로 한다. 이를 추정하기

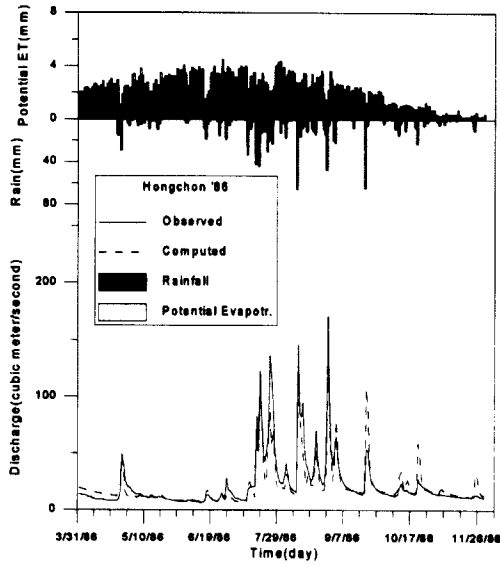


그림 5. 모형 보정 수문곡선 및 우량, 잠재 증발산량도 (1986년, 홍천 수위 관측소)

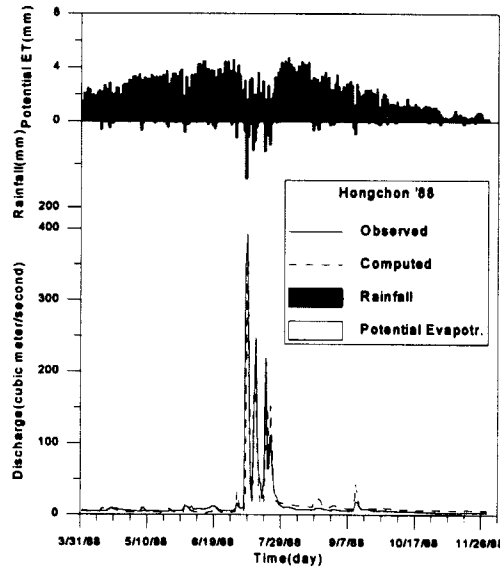


그림 6. 모형 보정 수문곡선 및 우량, 잠재 증발산량도 (1988년, 홍천 수위 관측소)

위한 하천단면 자료는 하천정비 기본계획 자료나 하상 변동 조사 보고서로부터 획득하였다. 수집된 하천 단면 자료를 가지고 수위-수면폭 자료를 형성하는 과정에는, DWOPER의 사용이 편리하도록 별도로 작성된

CROSS 프로그램을 사용하였다. 화천담부터 팔당담까지의 하천구간에 대해서는 45개의 하천 단면 입력자료를 작성하였으며, 남한강은 23개, 소양강은 5개 단면자료를 구성하였다.

5.2 경계조건

5.2.1 외부 경계조건

부정류 하도추적에는 상류단과 하류단에서 경계조건이 설정되어야 한다. 본 연구에서 모의하는 하도추적 구간은 남한강과 북한강, 소양강으로 선정하였으므로 각각에 대한 상류 경계조건으로서 충주댐, 화천댐, 소양강댐의 일 단위 방류량을 사용하였다. 팔당댐은 대상 하천구간의 하류 끝에 위치하고 있으므로 팔당댐 貯水위를 하류 경계조건으로 설정하였다. 貯水位 자료는 일 평균 저수위를 사용하였다.

5.2.2 내부 경계조건

DWOPER는 하천 중간에 舟運등을 목적으로한 갑문 또는 댐이 있을 때 내부 경계조건을 사용하도록 되어있다. 남한강과 북한강에도 이러한 내부 경계조건을 필요로 하는 水工 구조물들이 있다. 북한강에는 춘천댐, 의암댐, 청평댐이 위치하고 있고, 남한강에는 충주 조정지댐이 운영되고 있다. 내부 경계조건 입력자료로서 이들 댐의 관측 貯水위를 사용하였다. 댐의 貯水位는 유입량과 발전 및 여수로 방류의 제어효과가 결합되어 표현된 값이다. 따라서 내부 경계조건으로서 貯水위를 사용하는 것은 곧 댐 지점의 제어결과를 내포하고 있다.

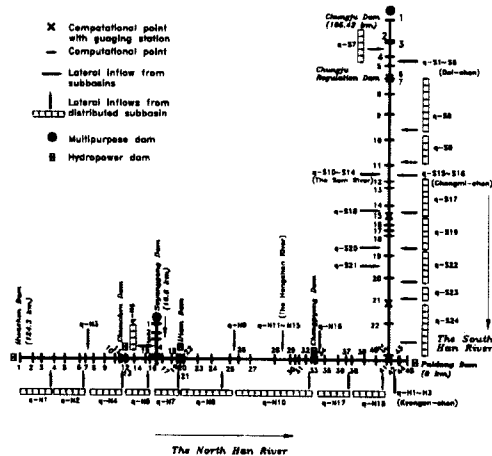


그림 7. 한강수계 다목적댐 하류 하도추적 체계

5.3 하도추적 체계

하도추적 本流 구간은 북한강의 화천댐부터 한강의 팔당댐까지이다. 소양강과 남한강은 支流로서 本流 河道에 유입된다. 구성된 하도추적 체계는 그림 7에 제시되어 있으며, 각 하도구간에 유입되는 소유역의 측방 유입구조도 표시되어 있다.

6. 日 單位 유역 유출 모형

6.1 강우-유출 모형 확대 적용

충주 및 소양강 다목적댐 하류부에 강우-유출 모형 적용을 위하여 구분한 소유역은 총 45개이다. 이 중 관측된 수위-유량 자료로부터 매개변수를 추정한 소유역은 5개로, 이들 자료를 이용하여 지역화 분석을 하기에는 자료가 너무 적고 토양 함수상태 관련 매개변수와 유역에 대한 물리적 인자와의 관계를 규명하는 것도 어려운 일이다. 그래서 나머지 40개 유역에 대한 강우-유출 모형 확대 적용에서, 모형의 토양 함수상태 관련 매개변수들은 인근 수위관측소 유역에서 추정된 자료를 그대로 이용하였다(표 1). 한편 유역사면 및 주하도의 조도계수는 Tabios III 등(1986)이 제시한 값을 사용하였다.

6.2 강우-유출 및 하도추적 통합모의

하도추적 체계와 45개 소유역의 유출량으로서 유역의 유출을 모의하였다. 전체 유출체계의 입력 요소는 강우량과 충주댐, 소양강댐, 화천댐의 방류량이고, 손실 요소는 증발산량이며, 출력요소는 팔당댐 지점의 방류량이다. 사용된 자료는 1986년과 1990년의 수문기상 자료와 댐자료이다. 본류 구간의 Manning 조도계수는, 먼저 남한강의 팔당댐부터 충주 조정지댐까지 0.0250-0.0255의 값을 사용하였는데 이는 '90년 9월

표 1. 소유역별로 사용된 매개변수 및 잠재 증발산량

소유역매개변수 추정수위관측소	매개변수 적용 유역	잠재증발산량 추정시 자료 사용 측후소
경 안	S ₂₂ , S ₂₃ , S ₂₄ H ₁ , H ₂ , H ₃	이천 수원
청 미	S ₁₅ , S ₁₆ , S ₁₇ , S ₁₈ , S ₁₉ , S ₂₀ , S ₂₁	이천
간 현	S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₈ , S ₉ , S ₁₀ , S ₁₁ , S ₁₂ , S ₁₃ , S ₁₄	충주 원주
홍 천	N ₁₁ , N ₁₂ , N ₁₃ , N ₁₄ , N ₁₅ , N ₈ , N ₁₀ N ₁₆ , N ₁₇ , N ₁₈ N ₁ , N ₂ , N ₃ , N ₄ , N ₅ , N ₆ , N ₇ , N ₈ , N ₉	홍천 양평 춘천

홍수에 대한 부정류 계산을 수행하면서 검증한 수치이다(이상호와 이길성, 1994). 충주 조정지댐 직상류 구간은, 모형의 정상적인 수렴에 초점을 맞추면서 0.0270을 사용하였다. 북한강도 위의 값들을 사용하였는데, 이 구간에 대해서는 적절한 검증을 거치지 않았으므로 차후 홍수 모의로 검증해야 한다.

모의결과는, 하류 댐 지점의 계산유량 수문곡선과 방류 수문곡선을 도시하여 고찰하였고, 여주와 양평 지점은 계산수위 수문곡선과 관측수위 수문곡선을 고찰하였다. 그리고 각각의 하류 댐에 대해서는 7일과 30일 및 모의기간 전체에 대한 유량합을 방류실적과 비교하였다. 충주댐과 소양강댐 등 상류의 수자원공사 관할 다목적댐의 이수목적 방류는 주간계획과 월간계획을 수립하여 실시하며, 이러한 계획은 하류 댐들을 관할하는 한국전력공사에 협의, 통보된다. 이수목적 방류는 모두 수력발전에 사용되며, 방류된 물은 하류 댐의 발전과 개별 허가자의 용수 이용, 팔당호의 수도권 광역상수도 취수 등에 이용된다.

북한강 수계의 춘천댐은 화천댐 방류량에 직접 영향을 받는 곳이며 그 사이에는 4개의 소유역으로부터 유출량이 유입된다. 4개 소유역의 면적은 768 km²로서 화천댐 유역 전체에 비하면 매우 작다. 따라서 화천댐의 방류량은 춘천댐의 유입량 및 방류량에 절대적인 영향을 준다. 1986년의 모의결과, 그림에서 보는 바와 같이 평상시나 홍수 발생시를 막론하고 계산 유량과 댐 방류량이 잘 일치하고 있다(그림 8). 7일 또는 30일간 계산된 유량을 합하여 방류실적과 비교한 결과 각기 19%, 16.8%의 평균 절대오차를 보였다(표 2). 계산 유량과 방류량의 총량은 7.3%의 차이를 보이고 있어 유역 강우-유출 모의의 물수지 오차가 크지 않음을 알 수 있다.

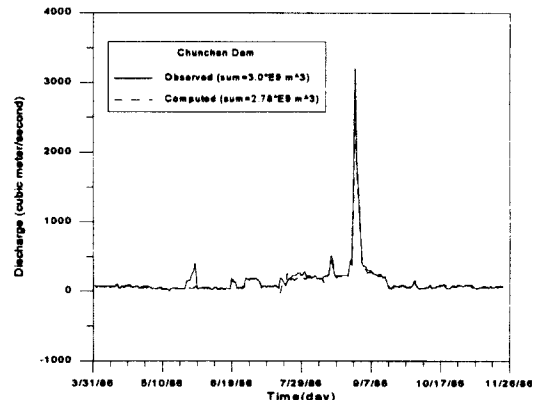


그림 8. 춘천댐 방류량 및 계산유량 수문곡선 (1986)

표 2. 댐 직하류 지점 계산 유량과 댐 방류량의 기간별 유량합 비교

연도	댐	7일간 유량합계의 평균 절대오차(%)	30일간 유량합계의 평균 절대오차(%)	모의기간 전체 유량합계와 절대 오차		
				방류량 합 (109 m ³)	계산 유량 합 (109 m ³)	절대오차(%)
1986년	춘천	19.0	16.8	3.00	2.78	7.3
	의암	8.6	8.7	4.24	3.94	7.1
	청평	18.4	14.5	4.82	4.99	3.5
	팔당	31.6	25.1	11.56	12.72	10.0
1990년	청평	20.2	16.8	14.1	12.8	6.4
	팔당	24.2	19.3	30.9	27.8	8.7

청평댐 지점에서는 두 유량 수문곡선의 오차가 확대되었는데 이것은 의암댐 하류부터 청평댐 사이에 홍천강을 비롯한 큰 지류들이 유입되고(유역면적 2,254 km²), 지류의 강우-유출 모의에서 발생된 오차가 영향을 미치기 때문이라고 생각된다. 유량의 총량 오차는 3.5 %로 다소 작아졌으나 수문곡선 각 값들은 의암댐

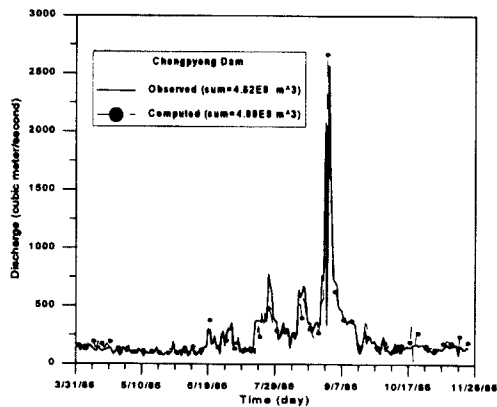


그림 9. 청평댐 방류량 및 계산유량 수문곡선 (1986)

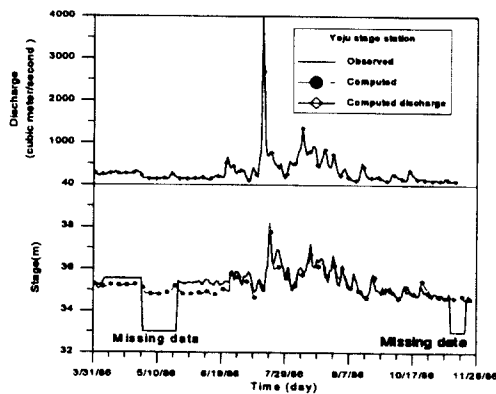


그림 10. 여주 수위관측소 수위, 유량 수문곡선 (1986)

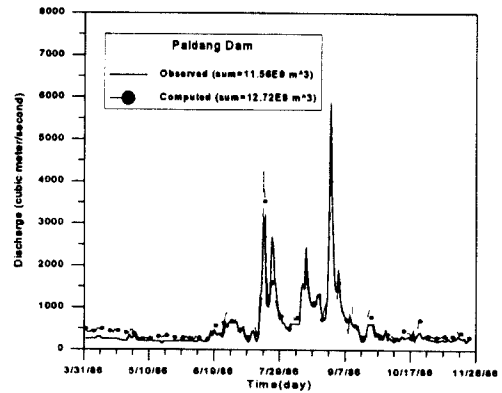


그림 11. 팔당댐 방류량과 계산유량 수문곡선 (1986)

이나 춘천댐보다 큰 오차를 보인다(그림 9).

한편 남한강의 여주 수위관측소의 경우에는, 4월부터 6월 말까지 약 0.5 m 이하의 수위 계산 오차를 보이고 있으나, 그 이후부터 11월 말까지는 대부분 0.2 m 이하의 오차를 보이고 있다(그림 10). 홍수가 발생한 7월 19일에는 약 0.8 m의 오차를 보이기도 하였다.

팔당댐 지점은 상류댐의 방류 영향과 소유역의 유출 모의 결과가 최종적으로 나타나는 곳이다. 1986년의 경우 유량 수문곡선을 비교하면(그림 11), 4월부터 6월 중순까지 남한강 모의에서 비롯된 오차가 계속 전파되고 있음을 볼 수 있으나, 그 이후부터는 전반적으로 두 수문곡선의 상대적인 오차가 줄어든다. 7일 또는 30일간 유량합의 평균 절대오차는 각각 31.6%, 25.1%였고, 총량으로는 10 % 이내의 차이가 발생하였다.

1990년은 자주 비가 내렸던 해이고 9월에는 매우 큰 홍수가 발생하였다. 이 해에 대해서도 1986년과 유사한 절차를 거쳐 유출을 모의하였다. 그리고 예측모형으로서의 사용 가능성을 타진하기 위해서 내부 경계조건을 고정시킨 모형수행 결과도 제시하였다.

먼저, 결과 제시에 앞서 부정류 하도추적 모형을 미래

상황의 예측모형으로서 활용하는데 따르는 문제를 논의할 필요가 있다. 개수로의 1차원 부정류의 해를 수치해법으로 구하고자 할 때는 경계조건이 필수 불가결한 입력자료이다. 본 연구에서 구성한 유역 유출체계에서는 상류댐과 하도 중간에 위치한 댐 및 하류단의 경계조건이 설정되어야 한다. 이 때 상류 경계조건인 충주댐, 소양강댐, 화천댐의 방류량은 미래에 대한 시나리오를 작성할 수 있는 값이다. 그러나 내부경계 조건인 춘천댐, 의암댐, 청평댐 貯水位와, 하류 경계조건인 팔당댐 貯水位는 미래 값을 설정하기 곤란하다. 이들은 상류댐의 방류량과 중간 지천으로부터의 유입량, 댐 자체의 방류 등이 복합적으로 작용하여 나타나는 결과이기 때문이다.

이 문제를 간략화하기 위한 방안의 하나로써, 내부댐과 하류댐의 貯水位를 고정시키고 貯水位 변동을 무시한 채 하도추적을 실시하였다. 만일 내부댐이나 하류댐이 홍수 제어나 용수공급의 기능을 가지고 운영된다면 큰 저류용량을 보유할 것이고 貯水位 변동도 클 것이다. 그러나 이들 댐은 발전만을 목적으로 하고 있으므로 貯水位 변동이 그리 크지 않다.

1990년의 모형수행 결과는 청평댐 지점과, 팔당댐 지점만을 도시하였다. 청평댐의 방류량과 계산 유량을 비교한 결과는 그림 12에 제시되어 있다. 계산 유량은 실제의 경계조건을 사용한 결과와 고정된 경계조건을 사용한 것이다. 관측된 댐 방류량 자료와 계산 유량값의 오차는 비홍수시에 매우 작은 결과를 보이고 있으나, 7월의 홍수에 대해서는 약간의 오차를 보이고 있다. 그러나 9월 홍수에 대해서는 계산값과 댐 방류량이 잘 일치하고 있다. 한편 실제 경계조건을 사용한 경우와 초기 貯水位를 그대로 고정시켜 계산한 경우는, 서로 큰 차이를 보이지 않았다.

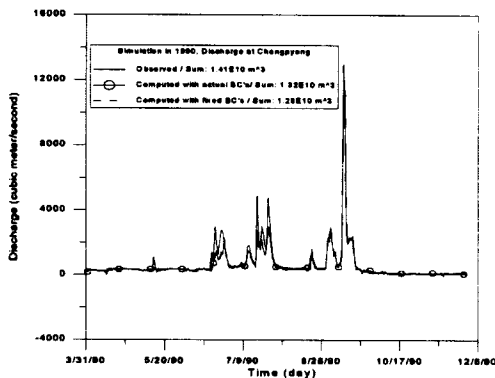


그림 12. 청평댐 방류량과 계산유량 수문곡선 (1990)

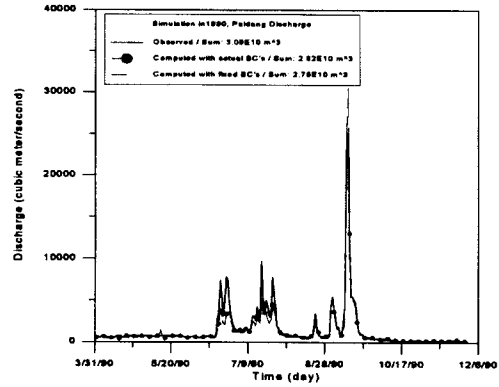


그림 13. 팔당댐 방류량과 계산유량 수문곡선 (1990)

최종적으로 팔당댐 지점의 유량을 비교한 결과는 그림 13에 제시되었다. 전체적인 경향은 청평댐의 결과와 유사하여, 비홍수시에는 댐 방류량 값과 계산 유량값이 큰 오차를 보이지 않는다. 경계조건을 실제값으로 사용한 경우와 초기 계산값으로 고정시킨 경우도 별다른 차이를 보이지 않는다.

7. 결론 및 향후과제

한강수계 다목적 댐 하류의 유역 유출체계를 구성하여 일 단위의 유출모의를 수행하였다. 유출체계는 홍수나 저수에 모두 적용될 수 있도록 구성하였으나, 본 연구에서는 일 유출모의만을 수행하였다. 소유역 강우-유출 모형은 Tabios III 등의 모형을 이용하였고, 남북한강 본류상 하도추적 모형은 DWOPER를 이용하였다.

1986년과 1990년의 자료를 가지고 4월부터 11월까지 모형을 수행하고서 7일 및 30일간 유량합계를 댐 방류량과 비교한 결과, 춘천댐, 의암댐, 청평댐 등 북한강의 댐들은 8.7~20.2%의 평균 절대오차를 보였다. 한강 본류의 팔당댐은 19.3~31.6%의 평균 절대오차를 보였다. 모의기간 전체에 대한 유량합계의 절대오차는 7.3~10%로 강우-유출 모의의 물 수지 오차는 그리 크지 않음을 볼 수 있다.

이러한 유출모의는 상류댐의 주간 또는 월간 발전 및 방류계획에 참고자료로서 활용될 수 있다. 그러나 보다 적합한 정보는 미래의 강우를 고려한 확률적인 유출 예측값이므로 이러한 방향의 연구가 수행되어야 한다. 그리고 향후 홍수에 대한 시자료를 이용하여 유역사면과 북한강의 조도계수를 추정하는 작업이 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 한국수자원공사 수자원연구소의 연구과제 수행결과를 보완, 수정한 것입니다. 연구 수행에 참여하여 도움을 주셨던 류태상 과장과 김우구 부장께 깊은 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- 이길성 (1996). 낙동강 수계 실시간 저수관리 시스템 개발(분석모델 부분) 보고서. 한국수자원공사.
- 이상호, 김영성, 신용노 (1995). 한강수계 다목적 댐 하류 연속유출모형과 동역학적 하도추적 모형연구. 연구보고서, WRI-WR-95-2, 한국수자원공사, 수자원연구소.
- 이상호, 이길성 (1994). "Muskingum-Cunge 방법에 의한 남한강 홍수추적." 한국수문학회지, 제27권, 제4호, pp. 105-114.
- 지흥기, 박기호 (1994). "유출예측을 위한 하도추적 모형." 한국수문학회지, 제27권, 제1호, pp. 141-150.
- 한국수자원공사 수자원연구소 (1993). GIS(지리정보 시스템)를 이용한 수자원 관리 및 계획에 관한 연구. 연구보고서, WRI-WR -93-10, p. 105.
- Barkau, R.L. (1993). *UNET One-dimensional unsteady flow through a full network of open channels, users manual*. US Army Corps of Engineers, CA.
- Burnash, J.C., Ferral, R.L., and Mcguire R.A. (1973). *A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computer*. Joint Federal-State River Forecast Center, U.S. Department of Commerce, NOAA National Weather Service, and State of California, Department of Water Resources.
- Gupta, R.S. (1989). *Hydrology and hydraulic systems*. Prentice Hall, New Jersey, pp. 81-84.
- Fread, D.L. (1987). *National Weather Service operational dynamic wave model*. National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Md.
- Johanson, R.C., and Imhoff, J.C. (1984). *Hydrological simulation program FORTRAN (HSPF): Users manual for release 9.0*. Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- McMahon, G.F., Fitzgerald, R., and McCarthy, B. (1984). "BRASS model: practical aspects." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 110, No. 1, pp. 75-89.
- O'Connell, P.E., Brunson, G.P., Reed, D.W., and Whitehead, P.G. (1986). "Case studies in real-time hydrological forecasting from the UK." *River flow modeling and forecasting*. Reidel Publishing Company, pp. 195-241.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering hydrology principles and practices*. Prentice-Hall, New Jersey, p. 59.
- Rockwood, D.M. (1969). "Application of streamflow synthesis and reservoir regulation-SSARR-program to the Lower Mekong River." *The use of analog and digital computers in hydrology*. Proceedings of Tucson Symposium, Vol. 1, IASH/AIHS -Unesco, pp. 329-344.
- Tabios III, G., Obeysekera, J.T., and Salas, J.D. (1986). *Hydrology and water resource program*. Colorado State Univ., Ft. Collins, Colorado.
- Unver, O., Mays, L.W., and Lansey, K. (1987). "Real-time flood management model for Highland Lake System." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 113, No. 5, pp. 620-638.

〈최종본 접수일 : 1997년 9월 9일〉