

저수지 운영을 위한 한국 하천 유출 모형의 비교

노재경^{1*} · 이재남²

¹충남대학교 지역환경토목학과, ²충남대학교 대학원 농공학과

Comparison of streamflow runoff model in Korea for applying to reservoir operation

Jaekyoung Noh^{1*} · Jaenam Lee²

¹Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Dept. of Agricultural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Received on 5 September 2011, revised on 16 September 2011, accepted on 19 September 2011

Abstract : To evaluate the applicability of inflow runoff model to reservoir operation in Korea, DAWAST model and TPHM model which are conceptual lumped daily runoff model and were developed in Korea, were selected and applied to simulate inflows to Daecheong multipurpose dam with watershed area of 4,134 km², and water storages in Geryong reservoir with watershed area of 15.1 km² and total water storage of 3.4 M m³. Evaluating inflows on an yearly, monthly, ten-day, and daily basis, inflows by DAWAST model showed balanced scatters around equal value line. But inflow by TPHM model showed high in high flows. Annual mean water balance by DAWAST model was rainfall of 1,159.9 mm, evapotranspiration of 622.1 mm, and inflow of 644.6 mm, from which rainfall was 104.8 mm less than sum of evapotranspiration and inflow, and showed unbalanced result. Water balance by TPHM model showed satisfactory result. Reservoir water storages were shown to simulate on a considerable level from applying DAWAST and TPHM models to simulate inflows to Geryong reservoir. But it was concluded to be needed to improve DAWAST and TPHM model together from imbalance of water balance and low estimation in high flow.

Key words : Reservoir operation, DAWAST model, TPHM model, Conceptual model, Equal value line

I. 서론

지금까지 우리나라에서 수문, 물수지 분석은 저수지 계획을 위한 것이었고, 운영을 위한 것은 없었다 해도 지나치지 않다. 즉 저수지 운영은 현장 물 관리자의 경험에 의해 수행하였다. 최근 뚝 높이기 사업으로 저수지로부터 관개용수와 하천유지용수를 동시에 공급해야 하며(MLTM, 2009), 합리적 운영 규정이 절실히 요구되고 있다. 여기에는 저수지 유입량, 관개용수와 하천유지용수의 필요수량에 대한 정도 높은 자료가 필요하다.

이 중 유입량 자료가 가장 중요하지만, 특히 저수지의 자료는 저수율 자료만 현장 관리자의 목측에 의해 관리되어 왔기 때문에 유입량에 의한 자료는 전무하다고 할 수

있다. 더구나 방류량 자료가 관리되지 않기 때문에 저수지의 물수지에 의해 유입량을 산정할 수 있는 여지도 없다. 과학적 저수지 운영을 위해서는 정도 높은 유입량의 생산이 필수이며, 한국 실정에 적합한 유출 모형을 검토하여 실용성을 평가하는 것도 의미가 크다.

강우-유출 모형은 수도 없이 많으며, 새로운 모형이 계속 개발되고 있다. 개념적 유출 모형을 중심으로 모형의 개발, 매개변수 결정, 지역화 등에 대해 최근의 몇 가지 해외 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. Moretti와 Montanari (2007)은 격자기반의 분포형 강우유출 모형을 웹에 발표하였다(<http://www.costruzioni-idrauliche.ing.unibo.it/people/alberto/affdef.html>). Kuchment 등(2000)은 영구동토 지역의 용설과 유출 모의를 위한 물리적 분포형 모형을 개발하여 유역면적 99,400 km²인 캐나다의 Kolyma 강 상류유역에 적용해 왔다. Das 등(2008)은 개념적 유출

*Corresponding author: Tel: +82-42-821-5796

E-mail address: jknoh@cnu.ac.kr

모형인 HBV 모형을 집중형, 반집중형, 반분포형 구조로 수정하여 중부 유럽의 중규모 유역에 적용한 결과, 반집중형, 반분포형 모형이 집중형, 분포형 모형보다 우수하다고 하였다. Seibert(1999)는 HBV 모형을 NOPEX 지역의 7~950 km²의 11개 유역에 적용하여 모형의 매개변수를 유역 특성과 연계시킨 결과 13개 중에서 6개가 유의하다고 하였다. Chen과 Adams(2006)는 인공신경망과 개념 모형을 통합한 강우-유출 모형을 제안하였으며, 소유역별로 유출 모의, 물수지를 고려하여 유역 특성의 공간변화를 준 분포형 모형으로 표현하였다. Liden과 Harlin(2000)은 HBV-96 모형을 유럽, 아프리카, 남미의 4개 유역에 적용하여 물수지 성분의 크기가 모형 성능에 많은 영향을 주며, 총 유출량을 모의하는 매개변수 조합은 다양할 수 있다고 하였다. Hundecha와 Bárdossy(2004)는 Rhine 강의 95개 유역에 개념적 강우-유출 모형을 적용하여 토지이용변화가 유출에 미치는 영향을 분석한 결과 도시화는 여름 호우의 낮은 침투 유출의 증가를 가져오나 겨울 용설의 높은 침투 유출의 증가는 적었으며, 무성한 산림으로부터 침투 유출과 총 유출량이 상당히 감소한다고 하였다. Gómez 등(2001)은 미국 미주리 주의 휴경지의 40개 강우사상에 대해 평균유출량과 변이계수의 관계를 분석하여 유출량의 변화의 50%는 토양의 수리전도도의 공간변이, 지표저류, 표토 토심이 나머지 50%는 강우 및 유출 자료의 오차로부터 발생한다고 하였다. Perrin 등(2001)은 모형의 매개변수 수와 모형 성능의 관계를 분석하기 위해 19개의 집중형 일 유출 모형을 429개 유역(대부분 프랑스, 일부 미국, 호주, 브라질)에 적용하여 복잡한 모형이 단순한 모형보다 보정에서는 우수하였으나 검정에서는 우수하지 않았으며, 원인은 복잡한 모형이 갖는 부족한 안정성이라고 하였으며, 이는 매개변수의 과다, 매개변수의 불확실성을 야기한다고 하였다. Refsgaard 등(2006)은 모형의 구조의 적합성을 분석하기 위해 기존 자료 범위를 벗어난 자료에 대해 외삽에 의한 불확실성을 예측할 수 있는 방법론을 제시하였다. Nandakumar와 Mein(1997)은 수문기상자료의 오차로 인한 강우-유출 모형의 불확실성과 토지이용변화에 대한 수문반응을 분석하였다. Monash 모형을 호주 빅토리아주의 5개 시험유역에 적용하였으며, 강우오차가 유량이 가장 크게 영향을 미쳤으며, 다음에 증발계 계수와 모형 매개변수가 상당한 영향을 미친다고 하였다. Post 등(1998)은 IHACRES 모형을 이용하여 연간 물수지가 미계측 유역의

일 유출 모의의 정도를 높인다고 하였다. Özelkan과 Duckstein(2001)은 개념적 강우-유출 모형의 요소를 불확실한 것으로 보고 퍼지(fuzzy)로 처리하여, 퍼지 룰로 운영 모드를 구성하고, 퍼지 회귀식으로 매개변수를 결정하였다. Anctil 등(2004)은 인공신경망 모형의 다층 인지체(MLP, multiple-layer perceptron)의 성능에 대한 관측 유출 자료의 기간에 대한 영향을 분석한 결과 9년의 자료는 모형의 성능을 개선시키지만 개념 모형의 경우는 개선시키지 못하는 것으로 나타났다. Xu(2002)는 국부 탐색자(local optimizer)와 타당영역 탐색자(feasible point finder)를 갖는 혼합 전역최적화법을 제시하였다. Huang과 Ye(2011)은 원 안에 같은 크기의 원을 최대한 많이 채우는데 여러 전역최적화법을 검토한 결과 준물리(quasi-physical) 전역최적화법으로 고전에 알려진 것보다 63개 더 채울 수 있다고 하였다. Barakat와 Altoubat(2009)는 철근콘크리트 물탱크의 재료 비용 절감을 위해 최적화 기법으로 복합혼합전개법(SCE, Shuffled Complex Evolution), 모의 단련법(SA, Simulated Annealing), 유전자 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 비교한 결과 SCE법이 우수하고 안전하다고 하였다. Cooper 등(2007)은 매개변수를 수문 과정에 적합하게 제한하여 SCE법에 의해 매개변수의 유의성을 개선하였다. Clarke(2008)는 유출 모형의 모의 성능에 대한 평가가 객관적이지 못하다 지적하고, 유역의 형태에 따라 다르게 모의할 수 있는, 모든 유역에서 모든 모형을 검증할 필요가 없는 모의 성능의 평가 방법을 제시하였다. Young(2006)은 영국의 260개 유역의 유출 모형의 지역화 방법으로 모형의 매개변수와 유역 특성과의 관계로부터 매개변수를 결정하는 방법과 가장 가까운 유역의 매개변수를 사용하는 방법을 사용하였다. Lee 등(2005)은 개념적 강우-유출 모형의 적정 구조와 유역 형태를 연계하기 위해 12개 모형 구조를 28개의 영국 유역에 적용하였으며, 지역화를 위한 모형 구조 선정에는 검보정 성능, 고저유량 모의 가능성, 매개변수 수를 고려해야 하며, 2개 수평 선형 저수지의 수정 Penman 모형, 2개 수평 선형 저수지의 확률 토양수분 분포 모형이 적합하다고 하였다. Post와 Jakeman(1999)는 호주 빅토리아 주의 Maroondah의 16개 소유역(1 km² 이하)에 매개변수 6개인 IHACRES (Jakeman 등, 1990)을 적용하여 매개변수를 결정하고, 매개변수와 유역특성의 관계식을 제시하였다.

우리나라에서 수자원 계획에 적용한 유출 모형은 탱크

모형과 DAWAST 모형이 있다. 탱크모형은 수자원 장기 종합계획(MOCT와 KOWACO, 2006)과 저수지 및 담수호 관리 계획(MAF와 KRC, 1998)에 적용되었으나 평균수기 유량이 높게 추정되었고, DAWAST 모형은 여러 하천정비기본계획(POC, 2008)에 적용되었으나 다소 낮게 추정돼, 회귀수를 반영하여 유출량을 높이기도 하였다(Noh, 2003).

탱크모형은 일본에서 개발하여 세계 여러 지역에 적용돼 왔으며, 우리나라에서 개발한 모형은 DAWAST 모형(Noh, 1991)이 최초이며, TPHM 모형(Kim, 2002)이 두 번째이다. 날마다 7일 정도의 유입량을 예측하는 저수지 운영의 실용성을 높이기 위해 매개변수의 수가 적은 것이 유리하다. 매개변수의 수는 탱크 모형이 적어도 10개 이상, DAWAST 모형이 5개, TPHM 모형이 2개로 되어 있다. 따라서 본 연구에서는 DAWAST 모형과 TPHM 모형을 비교 검토하여 저수지 운영의 적용성을 판단하고자 하였다. 여기서 모형을 개선할 수 있는 여지도 있겠으나, 또 다른 주제가 되기 때문에 단순히 나타난 현상 만 해석하는 것으로 하였다.

II. 연구자료 및 방법

1. 연구자료

가. 대상유역

유입량 자료의 신뢰도가 높은 대청댐 유역과, 같은 수계에 위치하고 2011년 6월에 뚝 높이기 사업을 준공한 공주에 위치한 계룡저수지 유역을 대상으로 유출 모형을 보정, 검증하고, 저수지 운영에 적용하는 것으로 하였다. 대청댐은 1981년에 준공되었고, 총저수량은 1,490백만 m³에 이르고, 2002년 상류에 유역면적 930 km², 총저수량 890백만 m³의 용담댐이 준공되었다. 계룡저수지는 1964년에 준공되었고, 총저수량 341.3만 m³, 수혜면적 450.2 ha, 인가면적 582.5 ha에 이른다.

대청댐의 유역면적은 4,134 km²로 논이 13.1%, 밭이 7.0%, 산림이 74.7%를 차지하며, 계룡저수지의 유역면적은 15.74 km² 논이 22%, 산림이 71%를 차지한다(Fig. 1).

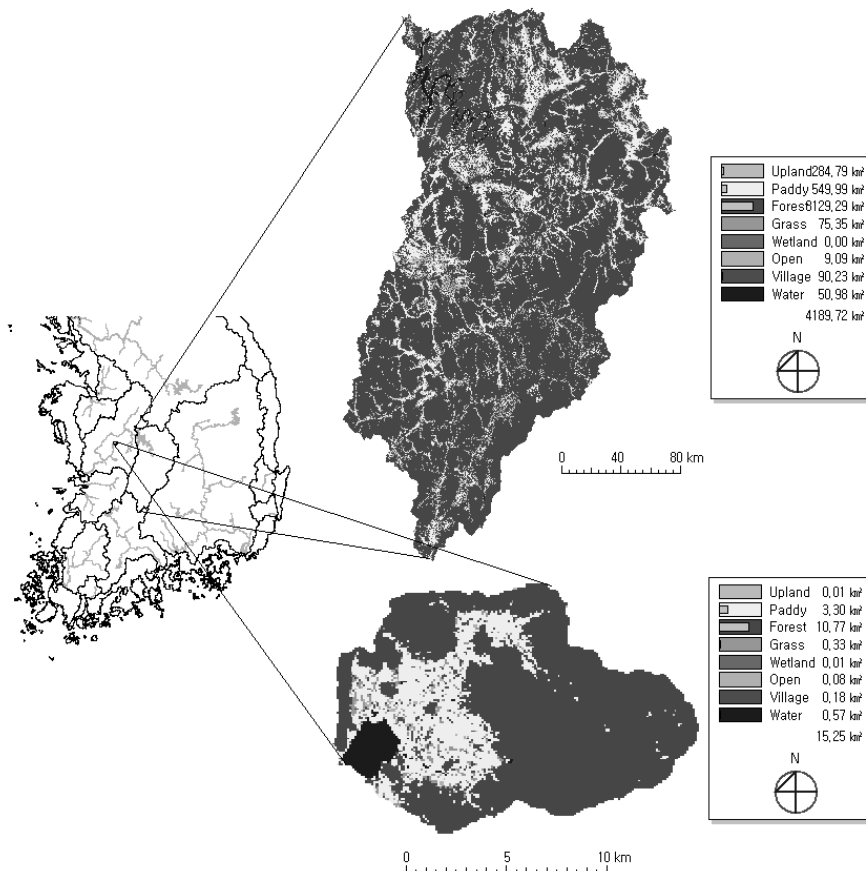


Fig. 1. Study area.

나. 수문기상 자료

대청댐 유입량 자료는 용담댐이 건설되기 이전인 1981년부터 2001년까지 사용하고, 기상자료는 대전 기상청의 자료를 사용하고, 계룡저수지의 저수율 자료(<http://rims.ekr.or.kr>)는 1991년부터 2010년까지 사용하며 이로부터 저수량을 계산하였다.

2. 연구방법

가. DAWAST 모형

DAWAST 모형은 우리 고유의 기상, 지상자료를 이용하여 개발한 개념적 집중형 일 유출 모형이며, 토양층을 불포화층과 포화층으로 구분하여 유역토양 물수지에 의해 토양수분저류능을 일별로 나타내, 일 강우, 증발자료를 입력하여 불포화층의 높이(UMAX), 포화층의 높이(LMAX), 포장용수량 높이(FC), 심층투수계수(CP), 유역증발산계수(CE) 등 5개 매개변수를 조정하여 일 유출을 모의한다(Noh, 1991). 또한 유역 용수의 회귀수를 반영하기 위해 용수수요를 고려한 DAWAST 모형(Noh, 2003)으로 모의 결과를 개선한 바 있다. 여기서는 논 용수량을 일별로 추정(Noh, 2004)하여 35%를 회귀수로 반영하고(MOCT와 KOWACO, 2006), 생공용수의 회귀수는 반영하지 않는 것으로 하였다.

총 유출량은 식(1)과 같이 직접 유출량과 기저 유출량을 합한 것으로 구성하며, 직접 유출량은 식(2)의 SCS 공식에 의해, 기저 유출량은 식(3)과 같이 불포화층과 포화층으로부터 발생하는 것으로 하였다.

잠재 저류능을 식(4)와 같이 정의한 것이 모형의 핵심이며, 일별 유역 물수지에 의해 보다 정확한 연속 유출모의를 가능하게 하였다. 불포화층의 토양 수분은 식(5)와 같이 강우에 의한 침투로 증가되고, 유역 증발산과 심층 침투에 의해 감소된다. 침투량은 강우량이 초기손실량보다 적으면 식(6)과 같이 강우량으로, 많으면 식(7)과 같이 강우량과 직접유출량의 차로 된다. 유역증발산량은 식(8)과 같이 토양수분의 상태에 따라 잠재 증발량의 곱으로 표현되고, 잠재 증발량은 식(9)와 같이 계기증발량의 일부로 보았다. 심층침투는 식(10)과 같이 강우시 불포화층의 토양 수분 상태가 포장용수량보다 크면 증력에 의해 발생하는 것으로 하였고, 무강우시는 식(11)과 같이 영(0)으로 처리하였다. 포화층의 토양 수분량은 식(12)와 같이 강우시에는 심층 침투에 의해 증가하며 포화층의 기저 유출에 의해 감소하고,

무강우시에는 식(13)과 같이 포화층의 기저 유출에 의해 감소한다. 불포화층의 기저유출량은 식(14)와 같이 감수곡선 계수 k_1 에 따라 감소하고, 포화층의 기저 유출량은 식(16)과 같이 감수곡선 계수 k_2 에 따라 감소한다.

$$Q = QD + QB \tag{1}$$

$$QD = (P - 0.2)^2 / (P + 0.8S) \tag{2}$$

$$QB = QBU + QBS \tag{3}$$

$$S = UMAX - WSU, UMAX > WSU \tag{4}$$

$$WSU_{i+1} = WSU_i + I_i - ET_i - PERC_i \tag{5}$$

$$I_i = P_i \quad \text{if } P_i \leq I_a \tag{6}$$

$$I_i = P_i - QD_i \quad \text{if } P_i > I_a \tag{7}$$

$$ET_i = Eo_i \times (1 - e^{-CE \times WSU_i}) \tag{8}$$

$$Eo_i = C \times EP_i \tag{9}$$

$$PERC_i = CP \times (WSU_{i-1} - FC) \times \frac{WSU_{i-1}}{UMAX}, \tag{10}$$

if $P_i > 0$ and $WSU_{i-1} > FC$

$$PERC_i = 0, \text{ if } P_i = 0 \text{ or } WSU_{i-1} \leq FC \tag{11}$$

$$WSS_{i+1} = WSS_i + PERC_i - QBS_i, \text{ if } P_i > 0 \tag{12}$$

$$WSS_{i+1} = WSS_i - QBS_i, \text{ if } P_i = 0 \tag{13}$$

$$QBU_i = (1 - k_1) \times (WSS_i - LMAX), \tag{14}$$

if $WSS_i > LMAX$

$$QBU_i = 0 \text{ if } WSS_i \leq LMAX \tag{15}$$

$$QBS_i = (1 - k_2) \times WSS_i \tag{16}$$

여기서, Q는 일 유출량(mm), QD는 직접 유출량(mm), P는 일 강우량, S는 잠재저류능, QB는 기저유출량(mm), QBU는 불포화층의 기저 유출량(mm), QBS는 포화층의 기저 유출량(mm), UMAX는 불포화층의 최대 토양수분량(mm), WSU는 불포화층의 토양수분량(mm), I는 침투량(mm), ET는 유역 증발산량(mm), PERC는 심층 침투량(mm), Eo는 잠재 증발량(mm), EP는 계기 증발량(mm), C는 증발접시 계수(0.70), CE는 유역 증발산 계수, FC는

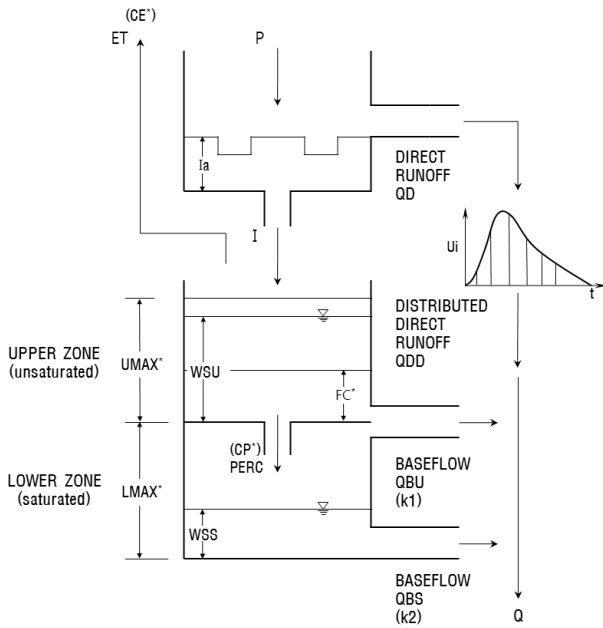


Fig. 2. Schematic diagram of DAWAST model.

포장 용수량(mm), CP는 침층 투수 계수, QBS는 포화층의 기저 유출량(mm), WSU는 포화층의 토양 수분량(mm), QBU는 불포화층의 기저 유출량(mm), LMAX는 포화층의 최대 수분량(mm), k₁은 불포화층의 감수 곡선 계수(0 < k₁ < 1), k₂는 포화층의 감수곡선 계수(0 < k₂ < 1)이다.

나. TPHM 모형

TPHM(Two-Parametric Hyperbolic Model) 모형은 집중형 모형(Kim, 2001)으로 유역저류량과 유출량의 관계를 쌍곡선 탄젠트 함수를 이용하여 표현하는 유역 물수지에 기반을 둔 비선형 수문모형이다. 물수지식은 식(17)과 같이 유역 저류량, 강우량, 유출량 및 증발산량으로 구성된다. 유출량 및 증발산량의 모의 과정에서 유역저류량을 식(18)과 같이 처리하였다. 유출량은 식(19)와 같이 유역 저류량의 쌍곡선 탄젠트 함수로 표현하며, S_{max}와 α는 모형의 매개변수로서, S_{max}는 유역 최대 저류량이다. 증발산량은 식(20)과 같으며, 매개변수 SM은 연구 결과 S_{max}의 1/10 정도라고 하였다.

$$S_t = S_{t-1} + P_t + Q_t + ET_t \tag{17}$$

$$\hat{S}_t = S_{t-1} + P_t \tag{18}$$

$$Q_t = [\tanh(\hat{S}_t / S_{max})]^\alpha \cdot \hat{S}_t \tag{19}$$

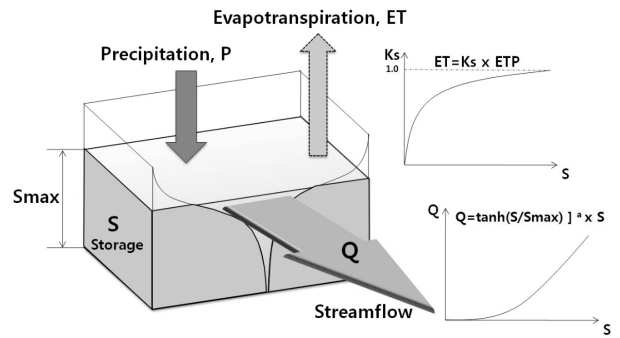


Fig. 3. Schematic diagram of TPHM model.

$$ET_t = \tanh(\hat{S}_t / SM) \cdot ETP_t \tag{20}$$

여기서, S는 유역 저류량, P는 강우량, Q는 유출량이며, ET는 증발산량, ETP는 잠재증발산량 혹은 계기증발량이고, 첨자 t는 t일, t-1은 t-1일의 값을 나타낸다.

다. DAWAST 모형과 TPHM 모형의 모의결과 비교

DAWAST 모형의 매개변수는 5개로 제약조건 없는 Simplex 방법(Mathews, 1992)에 의해 결정하고, TPHM 모형의 매개변수는 2개로 전역 최적화 기법인 SCE법(Duan 등, 1994)에 의해 결정하였다.

매개변수 방법을 동일한 방법에 의하는 것이 보다 객관적인 비교를 할 수 있겠지만, 여기서는 각 모형의 문헌에서 제시한 결과를 그대로 사용하는 것으로 하였다. 매개변수 조합은 목적함수 선택, 결정방법에 따라 수없이 많을 수 있기 때문이다.

DAWAST 모형의 매개변수는 UMAX 315 mm, LMAX 20 mm, FC 130 mm, CP 0.018, CE 0.007 등으로 제시하였고(Noh 등, 2010), TPHM 모형의 매개변수는 S_{max} 906 mm, α 1.44로 제시하였다(Kim, 2001).

제시한 매개변수를 각각 적용하여 모의한 유입량을 이용하여 작성한 수문 곡선과 등가선에서 관측, 모의 유입량을 일별, 순별, 월별, 연별로 비교하는 방법으로 모의 결과의 적합성을 판단하였다.

라. 유출 모형의 저수지 운영 적용 비교

유입량 자료가 없기 때문에 대청댐에서 결정한 매개변수를 적용하여 계룡 저수지의 유입량을 모의하고, 수혜면적의 관개용수를 일별로 산정한다. 다음에 저수량을 식(21)에 의해 일별로 모의하여 저수율로부터 계산한 관측 저수량과

비교하고, 등가선에서 관측-모의 저수량의 분포를 통해 유입량의 적합성을 판단하는 것으로 하였다. 여기서, 방류량은 식(26)에 의한 관개용수량 만큼 방류되는 것으로 하였으며, 오차는 없는 것으로 가정하였다.

$$SW_t = SW_{t-1} + QI_t - SQ_t - EW_t \quad (21)$$

$$OV_t = SW_t - SF \text{ if } H_t > FWL \quad (22)$$

여기서 SW는 저수량, QI는 유입량, SQ는 방류량, EW는 저수면 증발량, OV는 월류량, SF는 만수위 저수량, H는 저수위, FWL은 만수위이고, 방류량은 관개용수만 방류하는 것으로 처리한다.

논에서 벼가 필요로 하는 수량은 식(23)과 같이 증발산량(ET)과 침투량(I)를 더한 감수심에서 유효유량(Re)를 뺀 값이다. 증발산량은 식(24)의 잠재증발산량(ETo)에 작물계수를 곱해 구하며, 잠재증발산량은 태양복사량(Rn, mm/day)과 풍속함수(f)와 포화증기압과 실제증기압의 차이(ea-ed)의 온도가중값(W)과 기상조건 조정값(C)에 의해 산정하는 수정 Penman 법에 의하며, 현재 우리나라에서 논의 증발산량을 추정하는 표준 방법이다.

논의 담수심(D)은 식(25)와 같이 유효유량(Re)과 관개수량(Req)에 의해 증가하고 소비수량(U)에 의해 감소한다. 이로부터 저수지로부터 공급되는 관개수량은 식(26)과 같이 수심으로 계산되며, 여기에 수혜면적을 곱하면 수량으

로 된다(Noh, 2004).

$$Req(t) = ET(t) + I(t) - Re(t) \quad (23)$$

$$ETo = C [W \cdot Rn + (1-W) \cdot f(u) \cdot (ea-ed)] \quad (24)$$

$$D(t) = D(t-1) + Re(t) + Req(t) - U(t) \quad (25)$$

$$Req(t) = D(t) - D(t-1) - Re(t) + U(t) \quad (26)$$

III. 결과 및 고찰

가. DAWAST 모형의 모의결과

DAWAST 모형의 매개변수 UMAX 315 mm, LMAX 20 mm, FC 130 mm, CP 0.018, CE 0.007 등을 적용하여, 1981년부터 2001년까지 대청댐의 유입량을 일별로 모의한 결과는 Fig. 4와 같으며, 연평균하여 강우량 1,159.9 mm, 증발산량 622.1 mm, 유입량 644.6 mm로 나타났고, 연 유출률 55.6%로 관측값 644.9 mm, 55.6%와 정확하게 일치하였다.

유역 물수지를 장기적으로 볼 때, 강우량은 증발산량과 유출량의 합과 거의 같게 나타난다. 그러나 증발산량과 유입량의 합이 1,266.7 mm로 나타나 강우량 보다 무려 104.8 mm나 많게 나타나 모형 구조를 면밀히 검토해야 될 것으로 나타났다.

유출 성분별로는 직접 유출 349.5 mm, 불포화층 기저유

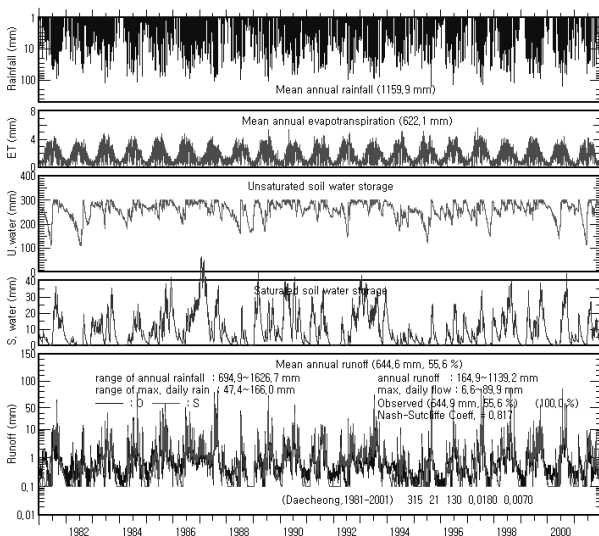


Fig. 4. Comparison of observed and simulated daily inflows by DAWAST model at Daecheong dam.

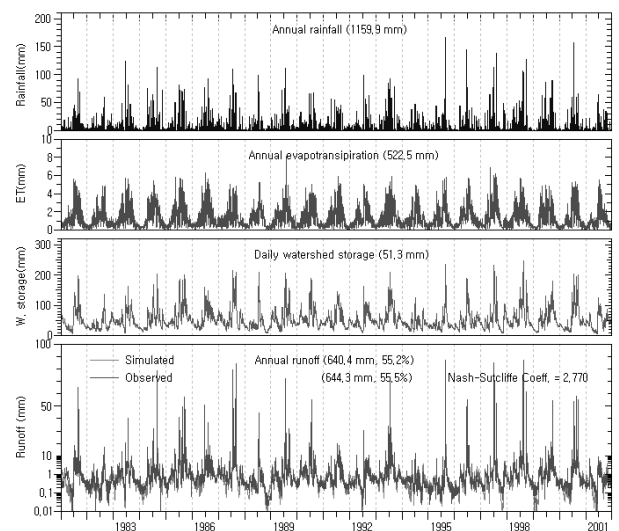


Fig. 5. Comparison of observed and simulated daily inflows by TPHM model at Daecheong dam.

출 34.8 mm, 포화층 기저유출 201.7 mm로 나타나, 직접 유출은 59.6%, 불포화층 기저유출은 5.9%, 포화층 기저유출은 34.4%로 나타났다. 또한 관개용수의 회귀수는 54.9 mm로 나타나 총 640.9 mm의 8.5%에 이르렀다. 불포화층의 기저유출의 비율이 낮게 나타나 불포화층과 포화층으로 구분하는 의미가 낮다고 할 수 있다.

일별 자료를 비교하면 NS 모형 효율(Nash와 Sutcliffe, 1970)이 0.817로 비교적 양호하였다.

나. TPHM 모형의 모의결과

TPHM 모형의 매개변수는 SCE법으로 Smax는 906, α는 1.44로 나타났다(Kim, 2002). 이 매개변수로 1981년부터 2001년까지 일별로 모의한 결과는 Fig. 5와 같으며, 연평균하여 강우량 1,159.9 mm, 증발산량 522.5 mm, 유입량 640.4 mm로 나타났고, 연 유출률 55.2%로 관측값 644.9 mm, 55.6%와 거의 일치하였다. 유역 물수지도도 거의 일치하는 것으로 나타나 모의 결과가 우수하였다. 그러나 일별 자료를 비교하면 NS 모형 효율(Nash와 Sutcliffe, 1970)이 2.770으로 높게 나타나 DAWAST 모형(Fig. 4)에 비해 일별 편차가 높았다.

다. DAWAST 모형과 TPHM 모형의 모의결과 비교

년, 월, 10일, 일별 관측, 모의 유출량의 등가선으로 모의 결과의 적합성을 판단하는 것으로 하였다. 연별 등가선

은 Fig. 6, Fig. 7과 같으며, DAWAST 모형에 의한 유량은 45도선에 고르게 분포되었으나 TPHM 모형의 결과는 저유량은 모의값이 많게 고유량은 관측값이 많게 나타났다. 월별 등가선은 Fig. 8, Fig. 9와 같으며, DAWAST 모형과 TPHM 모형에 의한 유량 모두 45도선에 고르게 분포되어 나타났다. 10일 간격의 등가선은 Fig. 10, Fig. 11과 같으며, DAWAST 모형에 의한 결과가 TPHM 모형의 결과보다 45도에 밀접하게 분포되었고, TPHM 모형에 의한 결과가 고유량에서 낮게 추정되는 양상을 나타냈다. 일별 등가선은 Fig. 12, Fig. 13과 같으며, DAWAST 모형에 의한 결과는 45도선을 중심으로 고르게 분포되었으나 분산이 넓게 나타났고, TPHM 모형에 의한 결과는 분산은 다소 작게 나타났으나 고유량 부분에서 모의 유량이 작게 나타났다. 일별 비교에서 분산이 크게 나타난 것은 갈수기 유량이 실제로 거의 일정하게 유지되나, 모형의 물수지로부터 지속적으로 감소돼 나타나기 때문에 관측과 모의 유량의 차이가 커지는 것으로 보인다. 이는 모형의 한계를 나타내는 것이기도 하고, 이를 해결하기 위해서는 또 다른 연구가 필요한 것으로 판단하였다.

결과를 요약하면 Table 1과 같으며, 관측-모의 유출량의 1차 방정식의 절편과 기울기를 비교하면, 연별, 순별, 일별은 DAWAST 모형이, 월별은 TPHM 모형이 양호한 결과를 나타냈고, R²과 RMSE로 비교하면 연별, 월별은 TPHM 모형이, 순별, 일별은 DAWAST 모형이 양호한 결과

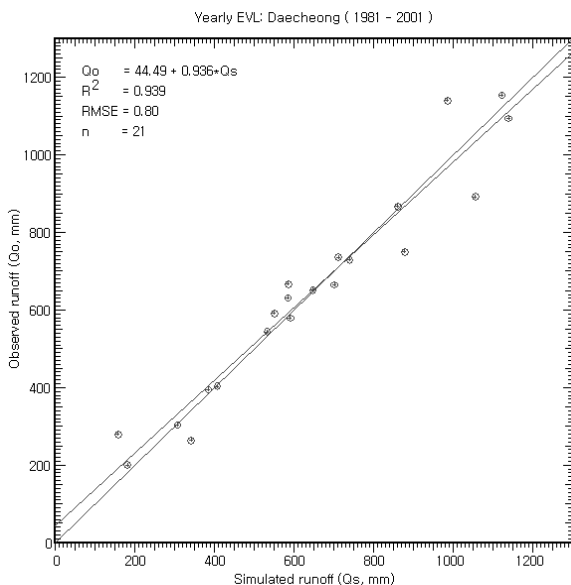


Fig. 6. Comparison of observed and simulated yearly inflows by DAWAST model through equal value line at Daecheong dam.

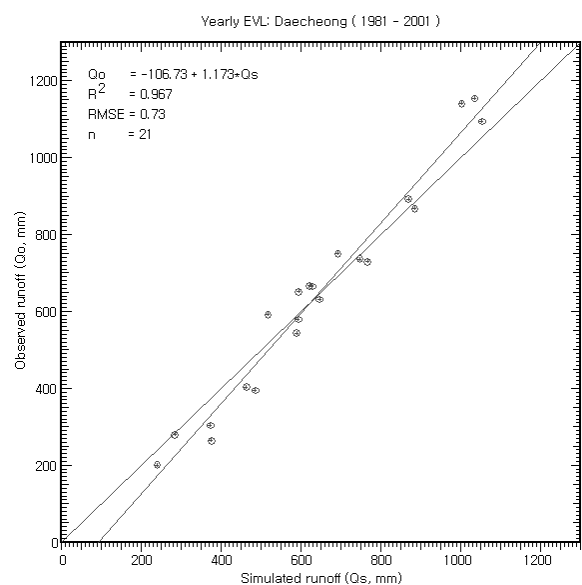


Fig. 7. Comparison of observed and simulated yearly inflows by TPHM model through equal value line at Daecheong dam.

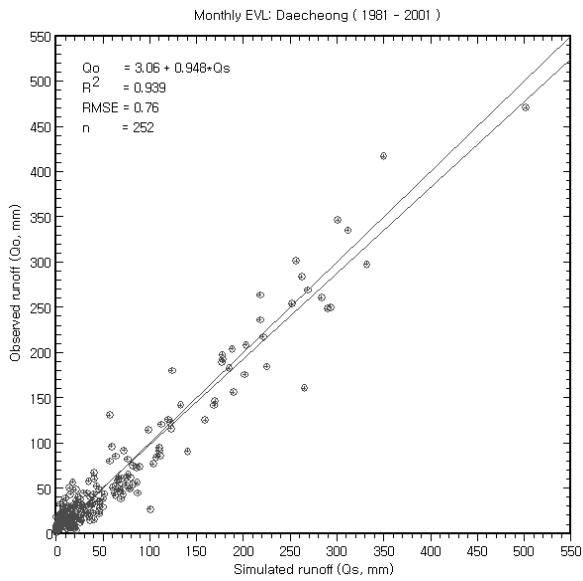


Fig. 8. Comparison of observed and simulated monthly inflows by DAWAST model through equal value line at Daecheong dam.

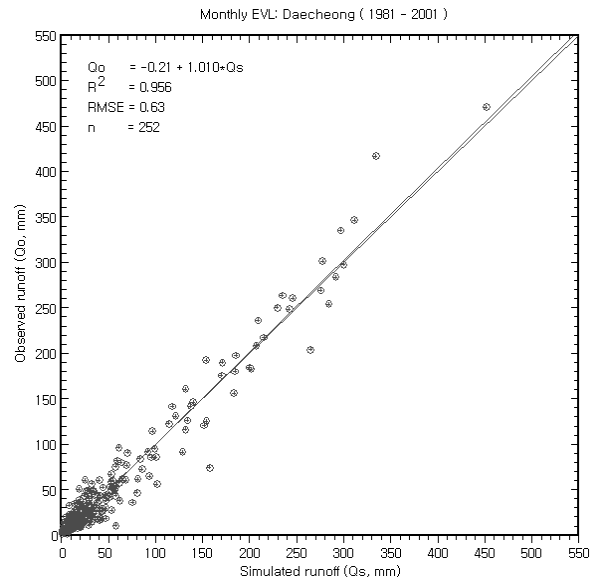


Fig. 9. Comparison of observed and simulated monthly inflows by TPHM model through equal value line at Daecheong dam.

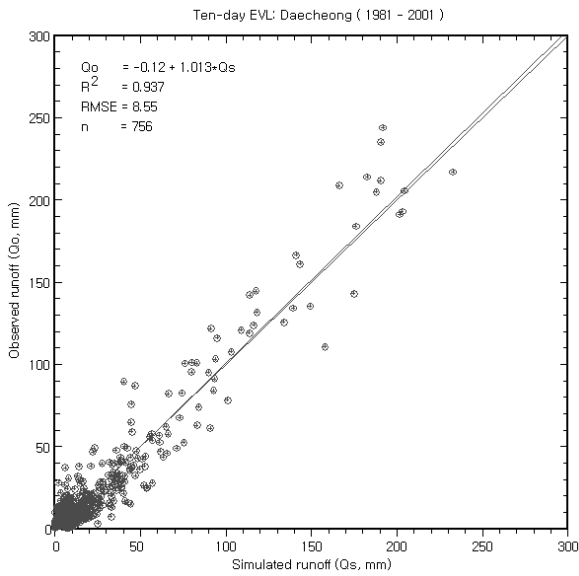


Fig. 10. Comparison of observed and simulated ten-day inflows by DAWAST model through equal value line at Daecheong dam.

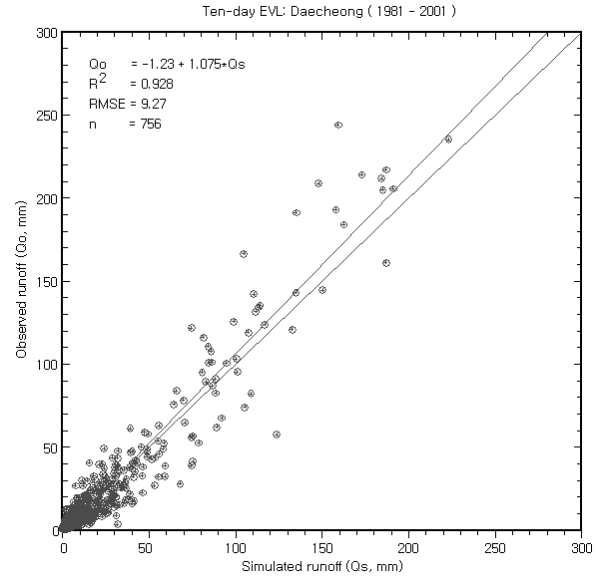


Fig. 11. Comparison of observed and simulated ten-day inflows by TPHM model through equal value line at Daecheong dam.

Table 1. Comparison of inflows by DAWAST and TPHM model on an yearly, monthly, ten-day, daily basis through equation, R² and RMSE.

| | Equation (Qo = a + bQs) | | R ² | | RMSE | |
|---------|-------------------------|----------------|----------------|-------|--------|------|
| | DAWAST | TPHM | DAWAST | TPHM | DAWAST | TPHM |
| Yearly | 44.49, 0.936 | -106.73, 1.173 | 0.939 | 0.967 | 0.80 | 0.73 |
| Monthly | 3.06, 0.948 | -0.21, 1.010 | 0.939 | 0.956 | 0.76 | 0.63 |
| Ten-day | -0.12, 1.013 | -1.23, 1.075 | 0.937 | 0.928 | 8.55 | 9.27 |
| Daily | 0.12, 0.939 | -0.38, 1.224 | 0.821 | 0.760 | 2.05 | 2.47 |

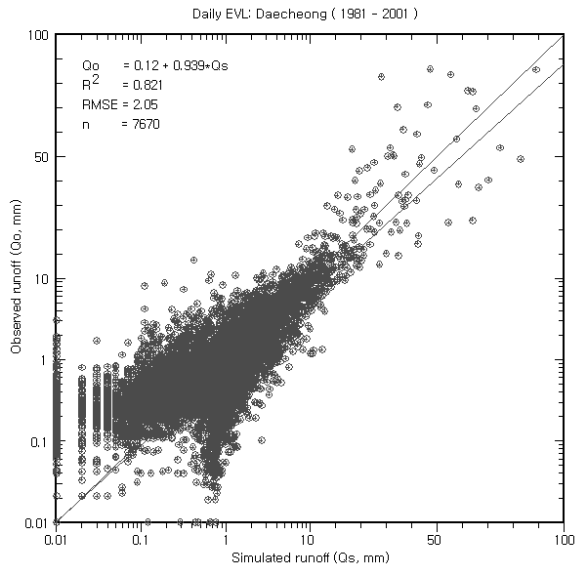


Fig. 12. Comparison of observed and simulated daily inflows by DAWAST model through equal value line at Daechong dam.

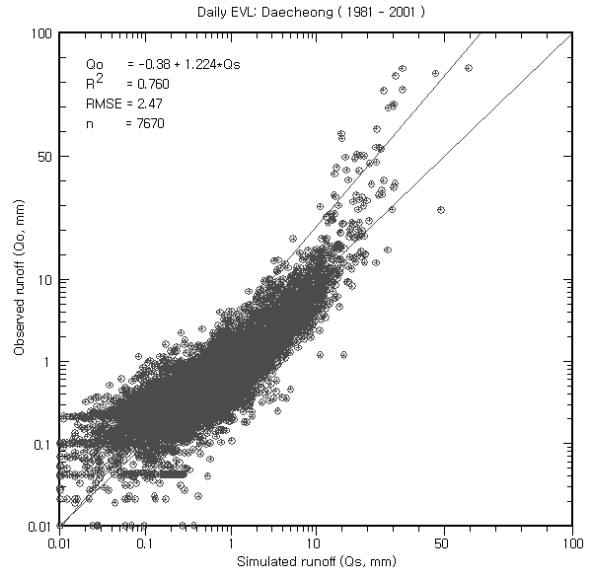


Fig. 13. Comparison of observed and simulated daily inflows by TPHM model through equal value line at Daechong dam.

를 나타냈다.

라. 유출 모형의 저수지 운영 적용 비교

유효저수량 341만 m³, 만수위 EL. 59.00 m, 사수위 EL. 47.00 m, 유역면적 15.7 km²인 계룡 저수지에 대해 1991년부터 2010년까지 용수공급능력을 분석한 결과 수혜면적이 490 ha이었을 때 저수량 변화의 이수안전도가 적합하였다.

DAWAST 모형에 의해 모의한 유입량을 적용할 때 저수량 변화를 일별로 모의하여 관측 저수량과 비교한 결과는

Fig. 14와 같으며, 저수지 물수지는 연평균하여 강수량은 2,031만 m³, 유입량은 1,167만 m³, 유출률은 57.4%, 저수면 증발량은 43백만 m³, 관개용수 공급량은 533만 m³, 월류량은 603만 m³, 평균저수량은 289만 m³로, 저수율은 84.6%였다. 이 때 관측, 모의 저수량을 등가선으로 비교한 결과는 Fig. 15와 같으며, 결정계수 R²는 0.548로 다소 낮게 나타났으나 등가선 중심으로 고르게 분포되었다.

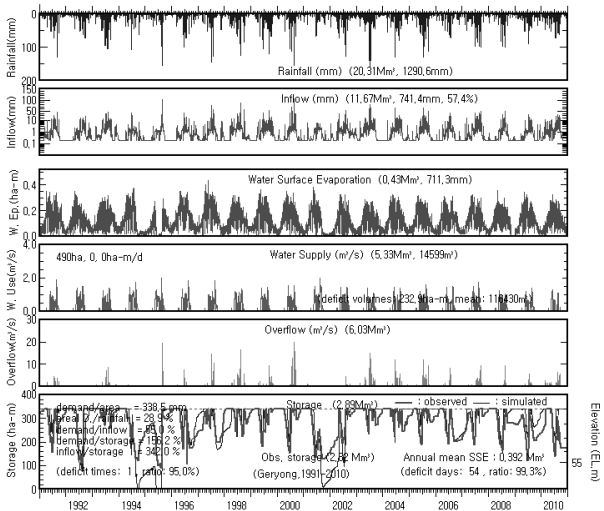


Fig. 14. Comparison of observed and simulated daily water storages of Geryong reservoir using inflows by DAWAST model.

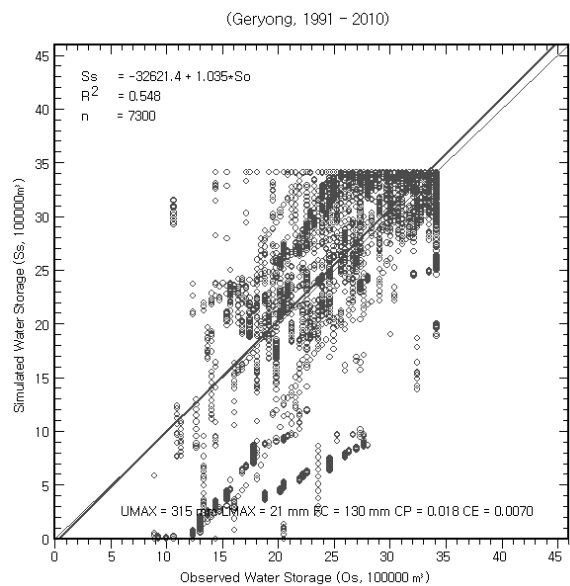


Fig. 15. Comparison of equal value line on daily water storages of Geryong reservoir using inflows by DAWAST model.

Table 2. Comparison of water storages using inflows by DAWAST and TPHM model through equation and R² at Geryong reservoir.

| Item | Equation (Ss = a + bOs) | | R ² | |
|-------|-------------------------|----------------|----------------|-------|
| | DAWAST | TPHM | DAWAST | TPHM |
| Daily | -32621, 1.035 | -312703, 1.125 | 0.548 | 0.620 |

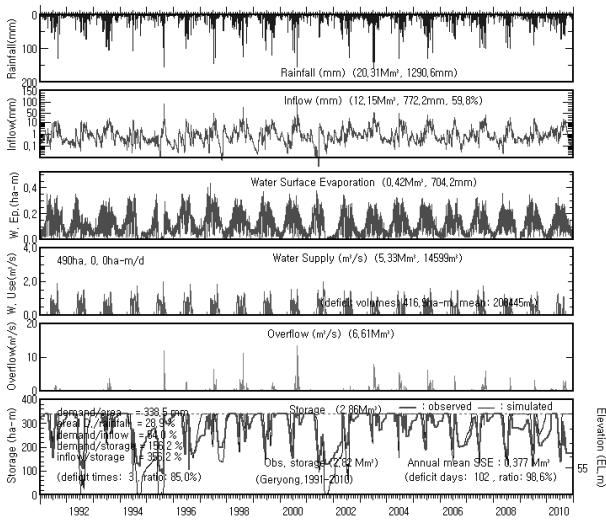


Fig. 16. Comparison of observed and simulated daily water storages of Geryong reservoir using inflows by TPHM model.

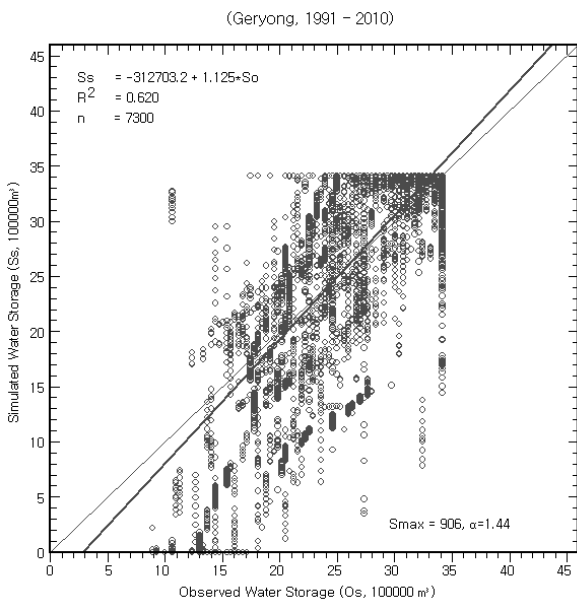


Fig. 17. Comparison of equal value line on daily water storages of Geryong reservoir using inflows by TPHM model.

TPHM 모형에 의한 결과는 Fig. 16과 같으며, 저수지 물수지는 연평균하여 강수량은 2,031만 m³, 유입량은 1,215만 m³, 유출률은 59.8%, 저수면 증발량은 42백만 m³, 관

개용수 공급량은 533만 m³, 월류량은 661만 m³, 평균저수량은 286만 m³로, 저수율은 83.9%였다. 이 때 관측, 모의 저수량을 등가선으로 비교한 결과는 Fig. 17과 같으며, 결정계수 R²는 0.620로 나타나 DAWAST 모형의 값보다는 약간 높게 나타났고, 등가선 중심으로 고르게 분포되었으나 고수위 부분에서 모의 저수량이 다소 높게 나타났다.

이 연구에서 유출 모형을 관개 저수지의 운영에 적용할 수 있는 가능성을 평가하는데 첫째 저수율로부터 계산한 저수량이 정확하고, 둘째 식(26)에 의해 추정된 일별 관개용수 수요량이 정확하다고 가정하였다. 그러나 실재는 저수율 자료가 현장 관리자의 목적에 의한 것으로 많은 오차가 있을 수 있고, 일별 관개용수 수요량이 현장의 기상조건과 재배관리에 따라 다양할 수 있다. 따라서 저수량의 등가선을 중심으로 분산이 넓게 나타나는 것은 당연하다고 할 수 있다. 이 상황에도 얻은 결과로부터 유출 모형의 적용성을 평가할 수 있다는 것은 의미가 있다 판단하였다.

요약하면, Table 2와 같이 등가선의 기울기로 비교할 때, TPHM 모형의 유입량을 적용하면 고수위의 저수량이 높게 나타나는 경향을 나타내었고, R²로 비교하면 TPHM 모형이 양호하게 나타났다.

결론적으로 DAWAST 모형과 TPHM 모형에 의한 유입량을 저수지 운영에 적용한 결과는 비교적 양호한 것으로 판단하였다. 그러나, DAWAST 모형의 유역물수지에 대한 불균형, TPHM 모형의 고유량 부분에서 작게 모의되는 부분이 확인된 만큼 향후 이에 대한 모형 개선이 수반되어야 할 것이다.

IV. 결론

저수지 운영의 필수인 유입량 모형의 적합성을 평가하기 위해 우리나라에서 개발한 개념적 유출 모형인 DAWAST 모형과 TPHM 모형을 선정하여 대청댐 유역에 적용한 결과를 비교하였고, 계룡 저수지의 저수량 모의에 적용한 결과는 다음과 같다.

1. 관측, 모의 유입량을 비교한 결과 연 유출량은 DAWAST 모형에 의한 값은 등가선에 고르게 나타났고, TPHM 모형에 의한 값은 저유량 부분에서 모의 값이 높게 고유량 부분에서 관측 값이 높게 나타났으며, 월 유출량은 DAWAST 모형과 TPHM 모형에 의한 값이 모두 고르게 나타났다.
2. 10일 간격의 유입량은 DAWAST 모형에 의한 값은 등가선에 고르게 나타났고, TPHM 모형에 의한 값은 고유량 부분에서 모의 값이 낮게 나타났다. 일별 유입량에서도 비슷한 양상을 나타냈고 그 정도가 심하게 나타났다.
3. DAWAST 모형에 의한 모의 결과의 연평균 유역 물수지는 강우량 1,159.9 mm, 증발산량 622.1 mm, 유입량 644.6 mm로 증발산량과 유입량의 합이 강우량보다 104.8 mm나 높게 나타나, 모형 구조의 면밀한 검토가 필요한 것으로 나타났다.
4. TPHM 모형에 의한 모의 결과의 연평균 유역 물수지는 거의 일치하는 것으로 나타났으나 고유량 부분에서 전반적으로 낮게 모의되는 것으로 나타났다.
5. DAWAST 모형과 TPHM 모형에 의해 모의한 유입량을 적용하여 계류 저수지의 저수량을 모의한 결과는 대체로 만족할 수준이었다.

종합하면 DAWAST 모형과 TPHM 모형에 의한 유입량을 저수지 운영에 적용해도 비교적 양호하였지만, 두 모형의 개선 사항이 노출돼 보다 합리적 모형으로 개선이 요구되는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- Ancil F, Perrin C, Andréassian V. 2004. Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. *Environmental Modelling & Software* 19(4): 357-368.
- Barakat SA, Altoubat S. 2009. Application of evolutionary global optimization techniques in the design of RC water tanks. *Engineering Structures* 31(2): 332-344.
- Clarke RT. 2008. A critique of present procedures used to compare performance of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* 352(3-4): 379-387.
- Chen J, Adams BJ. 2006. Integration of artificial neural networks with conceptual models in rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology* 318(1-4): 232-249.
- Cooper VA, Nguyen VTA, Nicell JA. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimisation methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology* 334(3-4): 455-466.
- Das T, Bárdossy A, Zehe E, He Y. 2008. Comparison of conceptual model performance using different representations of spatial variability. *Journal of Hydrology* 356(1-2): 106-118.
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 158(3-4): 265-284.
- Gómez JA, Nearing MA, Giráldez JV, Alberts EE. 2001. Analysis of sources of variability of runoff volume in a 40 plot experiment using a numerical model. *Journal of Hydrology* 248(1-4): 183-197.
- Huang W, Ye T. 2011. Global optimization method for finding dense packings of equal circles in a circle. *European Journal of Operational Research* 210(3): 474-481.
- Hundecha Y, Bárdossy A. 2004. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology* 292(1-4): 281-295.
- Jakeman AJ, Littlewood IG, Whitehead PG. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology* 117(1-4): 275-300.
- Kim HJ. 2001. Development of two-parametric hyperbolic model for daily streamflow simulation. Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea. [in Korean]
- Kuchment LS, Gelfan AN, Demidov VN. 2000. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions. *Journal of Hydrology* 240(1-2): 1-22.
- Lee H, McIntyre N, Wheater H, Young A. 2005. Selection of conceptual models for regionalisation of the rainfall-runoff relationship. *Journal of Hydrology* 312(1-4): 125-147.
- Lidén R, Harlin J. 2000. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. *Journal of Hydrology* 238(3-4): 231-247.
- Mathews JH. 1987. *Numerical Methods for Computer Science, Engineering, and Mathematics*. pp. 295-302. Prentice-Hall International, Inc.
- Ministry of Agriculture and Forest (MAF), Korea Rural Community Corporation (KRC). 1998. *Hydrological Survey Report for Planning Conservation of Water Quality in Lake Saemangeum*. [in Korean]
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT), Korean Water Resources Corporation (KOWACO). 2006. *2020 Water Vision(Modified)*. [in Korean]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). 2009. *Master Plan for 4 Major Rivers Restoration Project*. [in Korean]
- Moretti G, Montanari A. 2007. AFFDEF: A spatially distributed grid based rainfall-runoff model for continuous time simulations of river discharge. *Environmental Modelling & Software* 22(6): 823-836.

- Nandakumar N, Mein RG. 1997. Uncertainty in rainfall-runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change. *Journal of Hydrology* 192(1-4): 211-232.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Noh JK. 1991. A conceptual watershed model for daily streamflow based on soil water storage. Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea. [in Korean]
- Noh JK. 2003. Applicability of the DAWAST considered return flows. *Journal of the Korean Water Resources Association* 39(11): 1095-1105. [in Korean]
- Noh JK. 2004. A system for estimating daily paddy irrigation water requirements in simulating daily streamflow. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 46(7): 71-80.
- Noh JK, Lee JN, Kim YK. 2010. Development of standardized water balance model for applying irrigation district in South Korea. *Journal of Agricultural Science* 37(1): 105-112. [in Korean]
- Özelkan EC, Duckstein L. 2001. Fuzzy conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* 253(1-4): 41-68.
- Perrin C, Michel C, Andréassian V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242(3-4): 275-301.
- Post DA, Jakeman JA. 1999. Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in S.E. Australia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model. *Ecological Modelling* 123(2-3): 91-104.
- Post DA, Jones JA, Grant GE. 1998. An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. *Environmental Modelling & Software* 13(3-4): 395-403.
- Province of Chungcheongnam-do (POC). 2008. *Plan on Guryong Stream*. [in Korean]
- Refsgaard JC, Van der Sluijs JP, Brown J, Van der Keur P. 2006. A framework for dealing with uncertainty due to model structure error. *Advances in Water Resources* 29(11): 1586-1597.
- Seibert J. 1999. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99: 279-293.
- Xu P. 2002. A hybrid global optimization method: the one-dimensional case. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 47(2): 301-314.
- Young AR. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 320(1-2): 155-172.