

IHACRES 모형을 이용한 평창강 유역 내 관측 유량자료의 평가

Evaluation of Stream Flow Data Observed in the Pyungchang River Basin Using the IHACRES Model

박용희* · 유철상**

Park, Yong Hee · Yoo, Chulsang

Abstract

This study evaluated the runoff data collected at 12 stream gauge stations of the Chungjoo dam basin using the IHACRES model. Especially, the geomorphology-related parameters of the IHACRES model could be quantified base on the regionalization technique, which have also been applied many stream gauge stations of the Chungjoo dam basin. Summarizing the results is as follows. (1) The climate-related parameters of the IHACRES model c , τ_w^0 , and f are found to be estimated and used uniformly over the basin. (2) The geomorphology-related parameters of the IHACRES model t_q , t_s , and v_s are found to be estimated by considering the geomorphological parameters like the basin area, channel length, channel slope, basin slope through the regionalization based on the regression analysis. (3) Using the climate-related parameters applied uniformly over the basin and the geomorphology-related parameters estimated based on the regionalization procedure for each stream gauge station, a total of 12 stream gauge stations have been evaluated with their stream flow measurements. As results, the Sangnam and Youngwal 1 stream gauge stations have been found to make high quality flow data, but Youngwal, Baekokpo, and Panwoon stations low quality flow data. On the whole, 12 stream gauge stations considered show large differences with their data quality, so a plan for securing more consistent data quality should be prepared imminently.

Keywords : IHACRES, parameter estimation, regionalization, flow data

요 지

본 연구에서는 IHACRES 모형을 이용하여 충주댐 유역 내 12개 지점에 대한 관측유량자료에 대한 평가를 수행하였다. 특히, IHACRES 모형의 매개변수 중 지형특성 관련 매개변수를 지역화 기법을 이용하여 정량화하고, 이를 대상유역인 충주댐 유역의 여러 수위 관측지점에 적용하는 과정을 함께 수행하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) IHACRES 모형의 매개변수 중 기후특성을 반영하는 매개변수인 c , τ_w^0 , f 는 유역 전체에 동일하게 결정하여 사용할 수 있음을 확인하였다. (2) IHACRES 모형의 지형특성 매개변수인 t_q , t_s , v_s 는 지형특성인자인 유역면적, 유로연장, 하천경사, 유역경사와의 회귀분석을 통한 지역화를 통해 적절히 추정할 수 있음을 확인하였다. (3) 유역에 대해 일관되게 적용된 기후특성 매개변수와 지역화 과정을 통해 추정된 지형특성 매개변수를 이용하여 충주댐 유역 내 12개 수위관측지점에 대한 관측유량을 평가하였다. 그 결과 상안미, 영월 1 지점의 유량 자료가 상대적으로 정도가 높은 것으로 확인되었고, 영월, 백옥포, 판운 지점의 경우는 유출자료의 품질이 상대적으로 낮은 것으로 파악되었다. 전체적으로 보면 고려된 12개 지점의 관측품질에 많은 차이가 확인되며, 따라서 보다 일관된 관측품질의 확보를 위한 방안의 마련이 시급함을 판단할 수 있었다.

핵심용어 : IHACRES, 매개변수 추정, 지역화, 유량자료

1. 서 론

지역화란 한 유역의 정보를 다른 유역에 전이하여 적용하는 것을 말한다(Blschl and Sivapalan, 1995). 즉, 계측유역의 수문자료에 모형을 적용하여 얻어진 정보를 미계측유역에 적용하는 것이다. 강우-유출과정의 지역화 연구는 수문학적으로 동질성을 가진 지역은 비슷한 경향의 유출특성이 나타난다는 전제하에 수행된다. 간단하게는 지형특성만을 근거로 유

역을 구분하기도하며(Pilgrim, 1983; Nathan and McMahon, 1990; Post and Jakeman, 1996), 기후자료와 지형자료 등을 함께 고려하여 유역의 동질성을 평가하기도 한다(Tasker, 1982; Acreman and Sinclair, 1986; Burn and Boorman, 1993).

지역화의 대표적인 방법으로 다변량 회귀분석을 들 수 있다. Nash and Sutcliffe(1970)는 강우와 침투유량, 침투유량과 지형학적 인자들 사이의 연관성을 평가하기 위하여 다변량 회귀분석을 처음 사용하였다. 이 후 다변량 회귀분석은

* 유량조사사업단 · 공학석사 (E-mail : nana02p@kict.re.kr)

** 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경시스템공학과 교수

미국의 Heerdegen and Reich(1974), 캐나다의 Waylen and Woo(1984), 그리스의 Mimikou and Gordios(1989), 일본의 Ando(1990), 브라질의 Reimers(1990), 호주의 Nathan and McMahon(1992), Post and Jakeman(1996, 1999), Tung et al.(1997), Sefton and Howarth(1998), Pandey and Nguyen(1999) 등에 의하여 발전되고 폭넓게 적용되었다. 지역화 연구는 또한 특정 강우-유출모형의 매개변수 추정에 적용되기도 한다. 예를 들어 Vadewiele and Elias(1995)는 대상유역에 이웃하는 유역의 모형 매개변수를 적용하여 유출을 예측한 바 있으며, Burn and Boorman(1993)은 계측유역의 매개변수 값을 미계측유역으로 전이하는 방안으로 지역화에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 외에도 Kshirsagar et al.(1995)은 상류의 관측 자료를 이용하여 하류의 미관측된 측방유입을 추정하는 방안을 제시하였다. 미계측유역의 홍수량 또는 갈수량 예측에 관한 연구들도 지역화 연구의 중요한 응용분야이다(Acreman, 1985; Mimikou and Gordios, 1989; Burn, 1990; Zrinji and Burn, 1994; Nathan and McMahon, 1990; 1992; Reimers, 1990). 최근에 들어서는 미계측유역에서의 장기 유출모의를 목적으로 지역화 연구가 응용되기도 한다. 예를 들어, Vandewiele and Elisa(1995)는 미계측 유역의 월유출량을 모의하였고, Post and Jakeman(1996; 1999), Sefton and Howarth(1998)는 강우-유출모형과 유역의 물리적 특성과의 연관성을 이용하여 미계측 유역의 일유출을 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

국내의 경우 지역화에 대한 연구사례들이 아주 많지는 않다. 대표적인 예로서 섬진강영산강수계 6개 유역에 대해 모형의 매개변수와 유역특성인자와의 상관성을 분석한 연구(김석규와 김철, 2003), PRMS 모형의 매개변수 지역화에 관한 연구(조복희 등, 2004), PRMS 모형을 이용한 국내 5대강 수계의 수문요소에 대한 변동성 분석(김광천, 2005) 등을 살펴볼 수 있다.

본 연구는 관측된 유량자료의 평가를 주요 목적으로 하며, IHACRES 모형(Jakeman et al., 1996; Jakeman and Hornberger, 1993)을 적용하여 연구를 수행하였다. 본 연구의 내용은 근본적으로 주어진 모형을 미관측 유역에 적용하는 것과 유사한 성격을 갖는다. 이는 연구의 목적이 기존 관측자료의 평가를 목적으로 하므로 가용한 관측자료가 참값이라고 가정하지 못하기 때문이다. 따라서 주어진 모형의 매개변수는 관측자료를 일부 반영하는 정도에서 결정되거나 또는 전혀 고려하지 않은 상태로 결정되게 된다. 이러한 과정은 결국 본 연구의 성격을 모형 매개변수의 결정을 위한 지역화 연구로 바꾸어 놓게 된다. 본 연구도 궁극적으로는 IHACRES 모형의 미관측 유역 적용성을 평가하기 위한 매개변수의 지역화에 초점을 맞추게 된다.

본 연구에서는 먼저, 충주댐 유역의 12개 수위관측소의 가용자료를 분석하여 매개변수의 추정 및 지역화 과정에 사용될 수 있는 부분을 결정하는 것에서 시작한다. 이들 자료를 이용하여 매개변수를 추정하고, 그 결과는 지형특성인자들과의 회귀분석을 통해 정량화 한다. 매개변수 중 일부는 기후 특성에 영향을 받으므로 따로 처리해 주어야 한다. 결정된 회귀식을 이용하여 각 수위관측소 별로 매개변수를 다시 결

정하고 유출 모의를 수행하게 된다. 궁극적으로는 가용한 관측유량과 모의유량의 비교를 통해 관측유량을 평가하고 아울러 미계측 기간 동안의 유출량을 예측하게 된다. 이러한 과정을 통하여 IHACRES 모형의 적용성도 확인해 볼 수 있다.

2. IHACRES 모형

IHACRES 모형은 개념적 모형과 계량적 모형의 장점을 갖도록 만들어진 모형으로 유역의 기온 및 강우를 입력자료로 하여 유출을 모의한다. 이 모형은 크게 강우를 유효강우로 변환시키는 비선형 손실모듈(non-linear loss module)과 유효강우를 유출로 변환시키는 선형모듈(linear module)로 구성되어 있다. 비선형 손실모듈은 기후와 토지이용에 따른 토양수분의 변화를 고려하여 유효우량을 계산한다. 선형모듈에서는 선형저수지 및 선형하천의 개념을 도입하고 이들의 배열을 병렬(parallel) 또는 직렬(series stores)로 구성하여 유출특성을 잘 구현하는 조합을 선택하도록 한다. 이 개념은 IHACRES 모형에서 SRIV(simple refined instrument variable)방법으로 표현되어 있다(Jakeman and Hornberger, 1993).

먼저 비선형 손실모듈은 시간 k 에서의 유효우량 u_k 를 다음 식에 의해 계산한다.

$$u_k = s_k t_k \quad (1)$$

여기서 r_k 는 강우량이며 s_k 는 토양수분(soil moisture)를 나타낸다. 토양수분은 아래와 같이 선행 토양수분 및 현재의 강우량을 고려하여 결정된다.

$$s_k = c r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) s_{k-1} \quad (2)$$

위 식에서 c 는 체적저류상수(volumetric storage coefficient)로서 계산기간 동안 유효강우의 체적과 총 유출의 체적을 같게 하는 역할을 한다. 일반적으로 불투수층의 면적이 크거나 또는 포화된 상태를 유지하는 비율이 클 수록 큰 값을 나타낸다. τ_w 는 유역건조율(drying rate of catchment)을 나타내며 주로 무강우 기간 동안 토양수분을 감소시키는 역할을 한다. 식 (2)에 의하면, 유역건조율이 클 경우 현재의 토양수분은 선행 토양수분에 좀 더 많은 영향을 받는 구조로 되어 있다. 유역건조율은 아래와 같은 간단한 식에 의해 계산된다.

$$\tau_w(t_k) = \tau_w^0 \exp[(20 - t_k)/f] \quad (3)$$

위 식에서 t_k 는 일평균기온이고 f 는 온도조정계수(temperature modulation of drying rate)로써 온도변화의 영향정도를 결정한다. τ_w^0 는 유역의 기준건조율(drying rate of reference temperature)이며 건조율의 초기값을 나타낸다.

선형모듈에서는 비선형 손실모듈에서 계산된 유효강우를 시간에 따라 유출량으로 변환시킨다. 총 유출은 직접유출(빠른 흐름; quick flow)과 기저유출(느린 흐름; slow flow)로 구분되며, 각각은 당일 기여분의 합으로 표현된다.

$$q_k = q_q(k) + q_s(k) \quad (4)$$

$$q_q(k) = -\alpha_q q_q(k-1) + \beta_q u(k) \quad (5)$$

$$q_s(k) = -\alpha_s q_s(k-1) + \beta_s u(k) \quad (6)$$

위 식에서 q_k 는 총유출량을 나타내고 q_q 와 q_s 는 각각 직접 유출과 기저유출을 나타낸다. 매개변수 α 와 β 는 직접유출과 기저유출의 발생시간(당일 또는 익일) 조절을 위해 도입된 것으로 다음과 같은 관계를 갖는다. 여기서 Δ 는 시간간격 이다.

$$t_q = \Delta / \ln(-\alpha_q) \quad (7)$$

$$t_s = \Delta / \ln(-\alpha_s) \quad (8)$$

$$v_q = 1 - v_s = \frac{\beta_q}{1 + \alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1 + \alpha_s} \quad (9)$$

전체적으로 보면 비선형 손실모듈은 매개변수 c , τ_w^0 , f 로 정량화될 수 있고, 선형모듈은 매개변수 t_q , t_s , v_s 로 정량화될 수 있다. IHACRES 모형의 매개변수는 최적화기법을 적용하여 추정될 수 있다. 모형의 개발자인 Jakeman et al. (1996)은 보다 간단한 방법인 격자탐색법(grid-search)이란 최적화방법을 주로 사용하고 있는 것으로 알려져 있다. 현재까지 IHACRES 모형의 적용사례는 Croke et al.(2004), Kokkonen et al.(2003), Sefton and Howarth(1998), Jakeman et al.(1996) 등 다양하다.

위에서 언급한 기존의 연구사례들을 분석하여 우리나라의 특성과 비교한 결과 기본적으로 손실모듈의 매개변수 c , τ_w^0 , f 는 주로 기후특성에 영향을 받는 것으로 파악되었으며, 반대로 선형모듈의 매개변수 t_q , t_s , v_s 는 주로 지형특성에 영향을 받는다. 예를 들어 유출특성과 관련된 매개변수인 c 는 불투수면적비가 크거나 또는 호우가 빈번한 지역처럼 토양의 포화도가 크게 유지되는 지역일수록 값이 크게 나타난다. 유역의 기준전조율을 나타내는 매개변수 τ_w^0 는 온도가 높은 지역 일수록 크게 나타난다. 온도변화에 따른 증발량의 변화에 영향을 주는 매개변수인 온도조정계수 f 는 일 평균기온과 일 최대기온의 차이가 클수록 크게 나타난다. 우리나라의 기후

특성은 중부산간지방을 제외하고, 대체로 연평균기온은 10~16°C이며, 가장 무더운 달인 8월은 23~27°C, 5월은 16~19°C, 10월은 11~19°C, 가장 추운 달인 1월은 -6~7°C으로 연교차가 크게 나타남을 알 수 있다. 강수량은 중부지방은 1,100~1,400 mm, 남부지방은 1,000~1,800 mm, 경북지역은 1,000~1,200 mm이며, 경남해안 일부지역은 1,800 mm 정도, 제주도지방은 1,450~1,850 mm이고 계절적으로는 연 강수량의 50~60%가 여름에 내린다. 이러한 특성을 반영하여 외국의 연구사례들에 근거하여 분석하면 우리나라의 유역에 IHACRES 모형을 적용할 경우 매개변수 c 는 0.0045~0.0125 정도의 값, τ_w^0 는 6.0~15 정도, f 는 0.5~1.5 정도의 값을 가질 것으로 추정된다.

3. 유역의 지형특성을 고려한 IHACRES 모형 매개변수 추정

3.1 적용대상유역

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상유역으로 선정하였다. 충주댐 유역은 상대적으로 규모가 큰 자연유역으로, 특히 IHP 대표유역인 평창강 유역이 있어 수문자료의 확보가 보다 유리한 유역이다. 본 연구에서는 관측자료의 신뢰성이 높으며 인위적인 영향을 받지 않는 지점으로 판단되는 정선2, 거운, 영월2, 영월, 이목정, 장평교, 백옥포, 상안미, 방림, 판운, 주천, 영월1 수위관측소를 대상지점으로 선정하였다. 관측유량은 이들 각 지점의 수위자료를 수위-유량관계곡선식을 이용하여 결정하였으며, 강우자료로는 충주댐 유역 강우관측소 자료를, 기온자료는 대관령 지점의 것을 이용하였다.

3.2 자료의 구축

먼저 각 수위관측소의 수위-유량관계곡선식은 수자원종합정보 홈페이지(www.wamis.or.kr)에서 획득하였다. 본 연구에서는 획득한 수위-유량관계곡선식을 적용하여 각 관측소별 우기의 유량자료를 계산하고, 이를 강우자료와 비교 평가하여 사용에 큰 문제가 없는 부분을 선별하였다. 그 결과는 표 1과 같다. 아울러 유역의 지형특성인 유역면적, 유역경사, 하천연장, 하천

표 1. 각 수위관측소별 수위-유량관계곡선식 사용연도

관측소	수위-유량관계곡선식 보유연도	사용연도
정 선2	1984~1990, 2001~2002	1986, 2001, 2002
거 운	1984, 1985	1984, 1985
영 월2	1984~2003	1998, 2001, 2003
영 월	1982~1995, 2003	1986, 1987, 1988, 1993, 1994, 2003
이목정	1982~2001	1986~1990, 1993~1995, 1997, 1998
백옥포	1982~2001	1984, 1987, 1993, 1996~1998, 2000, 2001
장평교	1982~2001	1987~1991, 1996, 1999, 2000
상안미	1982~2001	1982, 1984, 1985, 1987~1994, 1997, 1998, 2000, 2001
방 립	1982~2001	1982, 1985~1991, 1999
판 운	1993~2003	1993, 1994, 1996~1998, 2003
주 천	1982~1985, 1995~2001	1982, 1986, 1996~1997, 2001
영 월1	1983~2003	1987, 1993, 1995~1998, 2000~2003

경사 등은 수자원 종합정보 홈페이지의 수치지형도(1 : 25000)를 사용하여 추정하였다(그림 1). 그 결과는 표 2와 같다.

3.3 IHACRES 모형 지형관련 매개변수의 지역화

먼저 표 1과 같이 선별된 자료를 이용하여 충주댐 유역의 정선2, 거운, 영월2, 영월, 이목정, 장평교, 백옥포, 상안미, 방림, 관운, 주천, 영월1 수위관측소에 대한 IHACRES 모형의 매개변수를 추정하였다. 먼저 기후특성 관련 매개변수는 기존 연구사례를 비교하여 각 매개변수의 추정값을 사용하였으며, 나머지 지형관련 매개변수는 일종의 최적화 방법인 격자탐색법(Jakeman et al., 1996)을 이용하여 결정하였다. 매개변수의 추정은 년도별로 각각 수행하였으며, 유역의 관측치가 너무 좋지 않아 각각에 대해 관측치와 모의치를 비교하여 둘 사이의 결정계수 R squared 값이 0.5 이상인 경우만을 골라 매개변수의 지역화에 사용하였다.

그림 2는 지형특성을 반영하는 매개변수 t_q , t_s , v_s 의 추정 결과를 상류로부터 거리의 함수로 나타낸 것이다. 각 지점에서의 매개변수는 년도별 추정치를 상대도수로 나타내어 그

특성을 살펴볼 수 있도록 하였다. 그러나 지형특성을 반영하는 매개변수 t_q , t_s , v_s 는 어떤 특정 인자에 의존되는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 이는 기후특성 관련 매개변수가 대체로 일정한 값들로 추정되는 결과와 상반된다. 이에 본 연구에서는 유역특성인자인 유로연장, 유역면적, 유역경사, 하천경사를 고려하는 다변량 회귀분석을 통하여 각 매개변수와 유역특성인자와의 연관성을 살펴보았다.

3.4 매개변수의 추정 및 검증

3.4.1 각 매개변수와 지형인자간의 회귀식 추정

IHACRES 모형의 6개 매개변수는 유역의 기후특성 및 지형특성을 반영하는 매개변수로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 특히 유역의 지형특성과 관련된 매개변수 t_q , t_s , v_s 에 영향을 미치는 유역특성인자를 선택하고 이들 사이의 관계를 파악하여 매개변수를 미계측유역에 전이하는 방법을 선택하였다. 유역특성인자로는 유출특성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단되는 유로연장, 유역면적, 유역경사, 하천경사를 선택하여 사용하였다. 충주댐 유역의 12개 수위관측소를 지점으로 하

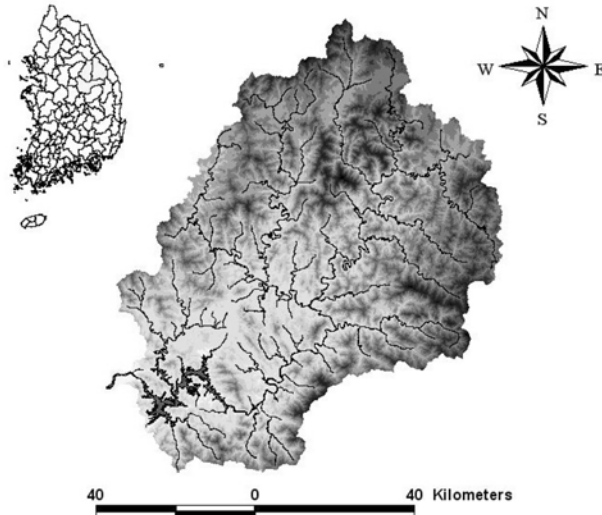


그림 1. 충주댐유역의 수치지형도

표 2. 충주댐 DEM을 이용한 유역의 지형특성 산정값

관측소	유역면적(km ²)	유역평균경사	하천평균경사	유로연장(km)	비고
정 선2	1834.72	0.065	0.0116	108.60	남한강상류
거 운	2162.50	0.061	0.0106	167.40	
영 월2	2319.78	0.061	0.0107	170.40	
영 월	2447.85	0.066	0.0108	186.50	
이목정	59.70	0.055	0.0136	18.42	평창강
장평교	106.40	0.053	0.0109	26.63	
백옥포	147.04	0.046	0.0110	26.93	
상안미	397.17	0.057	0.0116	48.15	
방 립	524.73	0.070	0.0133	52.60	
관 운	888.01	0.061	0.0126	110.00	
주 천	532.84	0.062	0.0090	107.83	
영 월1	1773.39	0.056	0.0096	125.73	

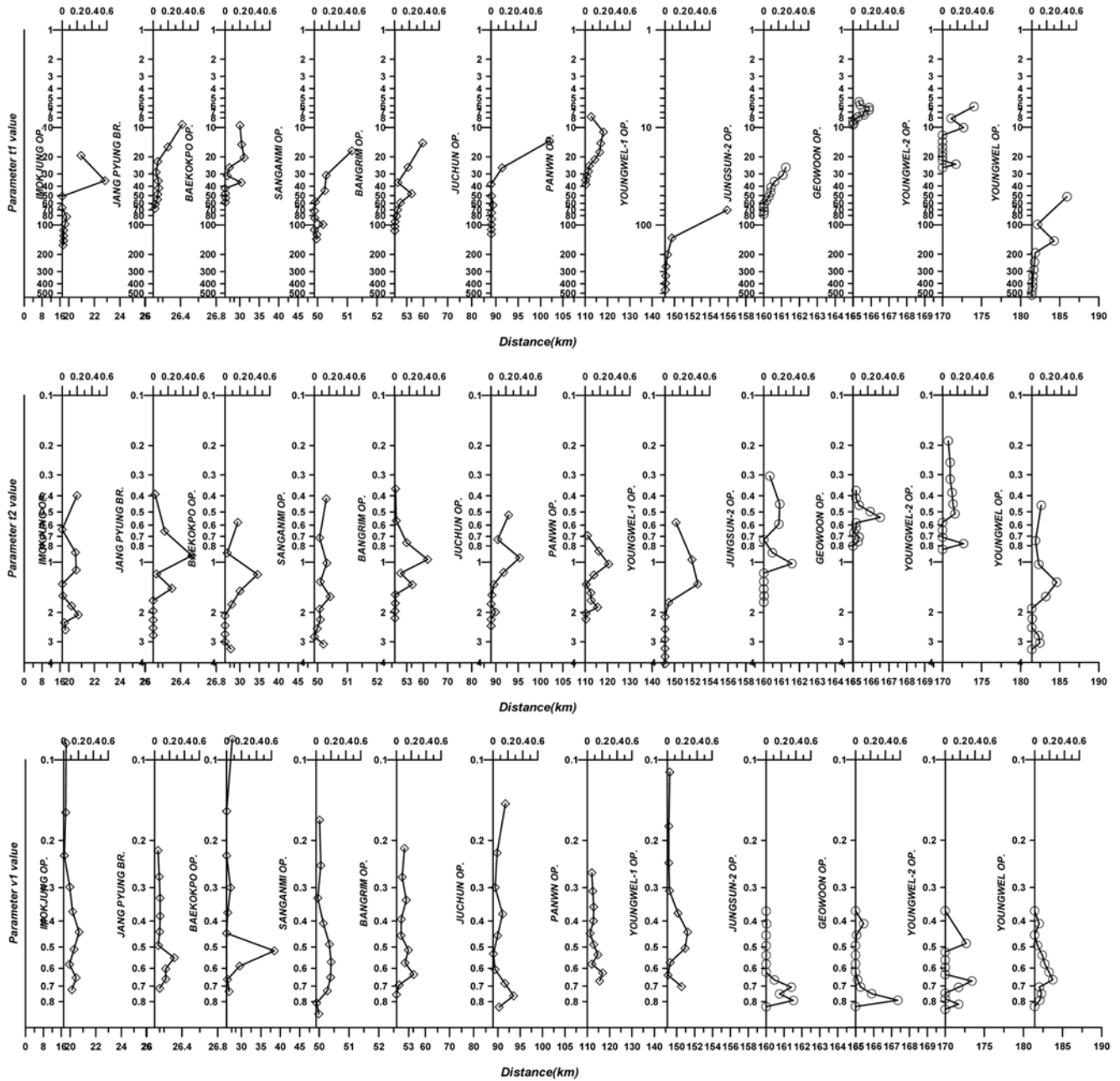


그림 2. IHACRES 모형의 지형특성 관련 매개변수 추정결과

여 계측유역에서 각 매개변수와 유역특성인자와의 연관성을 파악하고 회귀식을 산정한 후 이 식을 미계측유역에 적용하여 그 적용성을 확인해보았다.

회귀식의 형태는 IHACRES 모형의 매개변수를 종속변수로, 유역의 지형인자를 독립변수로 하는 비선형 모형이다. 비선형 모형은 일반적으로 선형모형의 경우보다 더 좋은 적용성을 나타낸다. 비선형 회귀분석에 대수(ln)를 취하면 다음과 같이 선형의 형태로 변환된다.

$$Y = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} \dots \quad (10)$$

$$\ln Y = \ln \alpha + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \beta_3 \ln X_3 + \dots \quad (11)$$

회귀분석 과정으로는 단계별선택법을 사용하였다(배현웅,

2004; 홍중선, 2000). 아울러 각 단계별로 적합도 검정, 유의성 검정, 잔치분석, 독립성 검토, 정규성 검토, 등분산성 검토, 다중공선성 검토 등을 수행하여 결과의 신뢰도를 확보하였다. 그 결과는 다음과 같다.

$$t_s = 41701.3L^{0.09133} S_s^{1.84798} \quad (12)$$

$$t_q = 3.14811A^{0.09217} S_s^{-0.7466} S_b^{0.83251} \quad (13)$$

$$v_s = 0.482992L^{0.11013} S_b^{-0.29695} S_s^{0.34814} \quad (14)$$

위의 식을 적용하여 각 관측소의 매개변수 값을 산정한 결과는 다음 표 3과 같다. 또한, 관측된 매개변수의 값들과 추

표 3. 각 관측소별 매개변수값 결과정리

관측소	t_s	t_q	v_s
거운	14.9	1.092328	0.400008
정선2	17.0	1.106048	0.386200
영월2	15.2	1.105343	0.401713
영월	15.6	1.058104	0.398018
이목정	19.3	1.043132	0.352814
장평교	13.3	0.940734	0.343947
백옥포	13.5	1.085544	0.360310
상안미	15.7	1.059506	0.367154
방림교	20.4	1.044922	0.365812
관운	19.8	1.162032	0.405619
영월1	12.1	1.052727	0.384083
주천	10.6	0.827651	0.358257

정된 매개변수의 값들의 산포도는 그림 3과 같다. 전체적으로 보면, 유역의 기저유출의 감수율을 나타내는 매개변수 t_s

값은 10에서부터 20까지의 값을 나타내고 있고, 유역의 직접 유출의 감수율을 나타내는 매개변수 t_q 는 0.9에서부터 1.2까지 값을 나타내고 있다. 기저유출의 부피비를 나타내는 매개변수 v_s 는 0.34에서 0.41까지의 값을 나타내고 있다. 그림 3과 같이 격자탐색방법을 이용하여 모형의 최적 매개변수를 찾는 과정을 거치다 보면 여러 특성을 반영하기 위하여 매개변수들이 한 특성에 여러 가지 값을 보인다. 이러한 값 중에서 지역특성에 맞는 최적의 변수를 찾기 위하여 회귀식을 이용한 분석을 실시하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

3.4.2 추정된 회귀식 검증

그림 3에서 살펴볼 수 있는 것처럼 지형과 관련된 매개변수는 그 변동폭이 매우 크다. 따라서 추정된 회귀식의 정확성을 확인해 볼 필요가 있다. 이런 목적으로 결정된 회귀식으로 추정된 IHACRES 모형의 유출 모의결과를 충주댐의 유입량과 비교하였다. 사용된 자료는 1986년부터 2003년까지

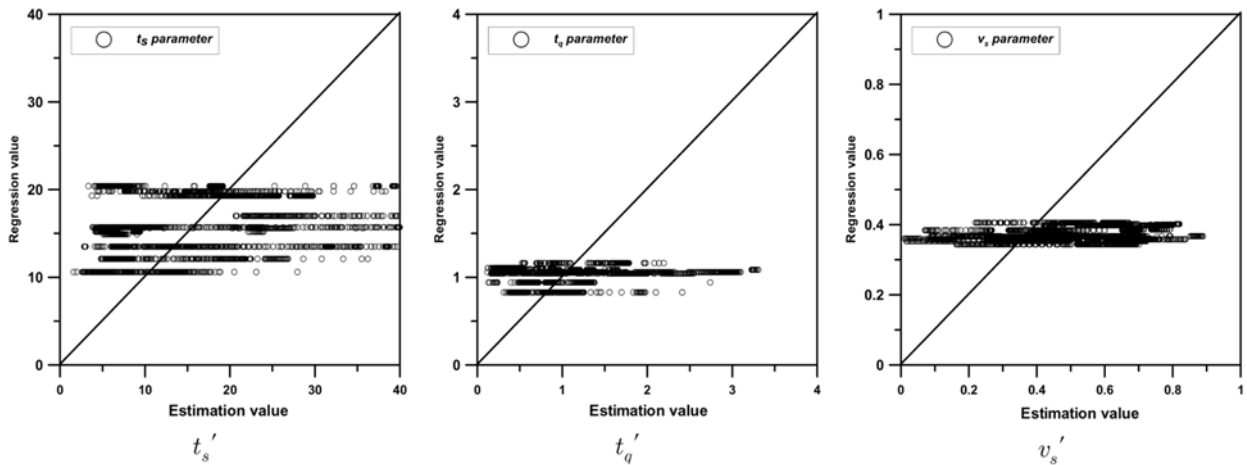


그림 3. 측정된 t_q 와 t_s , v_s 의 비선형 회귀식으로 추정된 값(t_q 와 t_s , v_s)들의 산포도

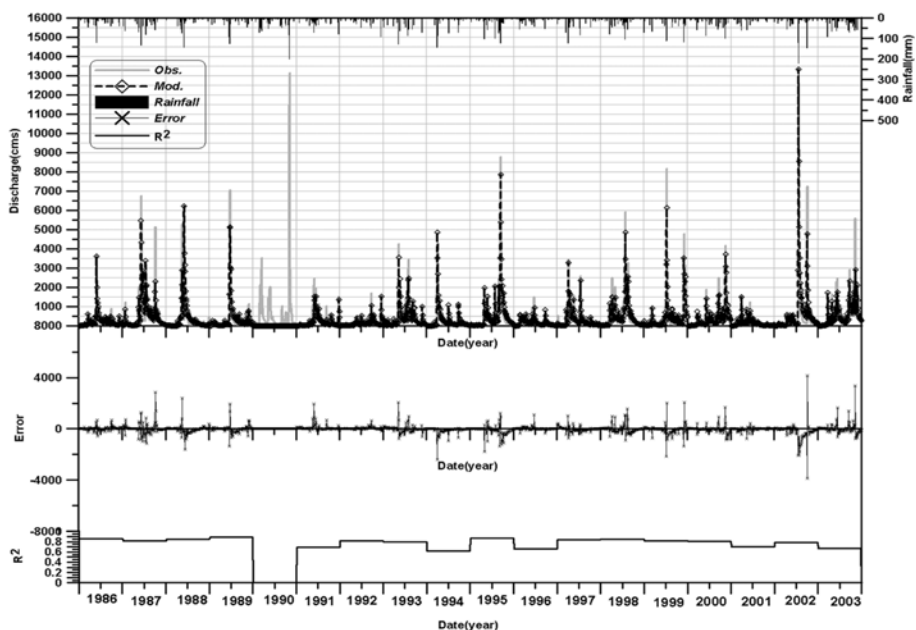


그림 4. 충주댐지점의 유량평가 결과

표 4. 목적함수를 이용한 연도별 유출모형 정확도 평가

구분	설명	식
R Squared	Measure of fit between observed and modelled streamflow	$1 - \frac{\sum(Q_o - Q_m)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2}$
R2_sqrt	Variation of R Squared, giving less weight to peak flows	$1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_o} - \sqrt{Q_m})^2}{\sum(\sqrt{Q_o} - \sqrt{\bar{Q}_o})^2}$
R2_log	Variation of R Squared, giving equal weight to all flow percentiles	$1 - \frac{\sum(\ln(Q_o + \epsilon) - \ln(Q_m + \epsilon))^2}{\sum(\ln(Q_o + \epsilon) - \ln(\bar{Q}_o + \epsilon))^2}$

표 5. 목적함수를 이용한 연도별 유출모형 정확도 평가

년도	R squared	R2_sqrt	R2_log	년도	R squared	R2_sqrt	R2_log
1986	0.863	0.737	0.682	1987	0.814	0.839	0.859
1988	0.848	0.780	0.671	1989	0.886	0.800	0.731
1990	-	-	-	1991	0.692	0.703	0.701
1992	0.815	0.746	0.719	1993	0.794	0.749	0.720
1994	0.614	0.675	0.724	1995	0.865	0.817	0.834
1996	0.658	0.781	0.839	1997	0.841	0.730	0.665
1998	0.846	0.859	0.863	1999	0.819	0.807	0.802
2000	0.811	0.799	0.813	2001	0.703	0.680	0.708
2002	0.786	0.720	0.760	2003	0.670	0.783	0.823

충주댐 유입량자료, 대관령관측소의 기상자료, 충주댐 유역의 면적평균강우량 등이다. 그 결과는 그림 4와 같다. 이 결과에 대한 정량적 평가를 위해 표 4의 식을 이용하여 모의치와 관측치 사이의 결정계수(R squared), 모의치와 관측치에 제곱근을 취한 후 추정된 결정계수(R2_sqrt), 마지막으로 모의치와 관측치에 대수를 취한 후 추정된 결정계수(R2_log)를 이용하였다. 이들 값들은 관측치의 신뢰도 차이, 강우 특성의 차이 등을 반영하기 위해 년 단위로 추정하였다(표 5). 그 결과 R squared값이 0.6이상, R2_sqrt값이 0.72이상, R2_log값이 0.65 이상을 보여 본 연구에서 결정된 회귀식의 정확성이 높은 것으로 판단할 수 있었다. 참고로 표 5 및 그림 4에서 1990년에 해당하는 내용이 없는 것은 이때의 관측자료가 모의자료와 매우 달라 평가를 보류하였기 때문이다.

4. 각 관소측별 관측유량의 평가 및 보완

4.1 관소별 평가

본 장에서는 전장에서 추정된 회귀식을 통해 결정된 IHACRES 모형의 매개변수를 적용하여 12개 수위관측소의 관측유량을 평가하고 아울러 결측 부분에 대한 보완을 수행하였다. 본 논문에서는 그 중 일부인 영월 2, 판운 및 주천 관측소에 대한 결과를 정리하였다.

먼저, 영월2 관측소의 관측자료로는 1986년부터 2003년까지의 약 18년간의 유량자료(수위자료와 수위-유량 관계곡선)가 있다. 회귀식에 의해 계산된 모형의 매개변수를 적용한 결과는 그림 5 및 6과 같다. 먼저 그림 5는 1999년의 경우를 자세히 비교한 것이다. 그림에서 살펴볼 수 있는 것처럼 첨두유량과 기저유량은 비교적 잘 일치한다는 것을 알 수 있

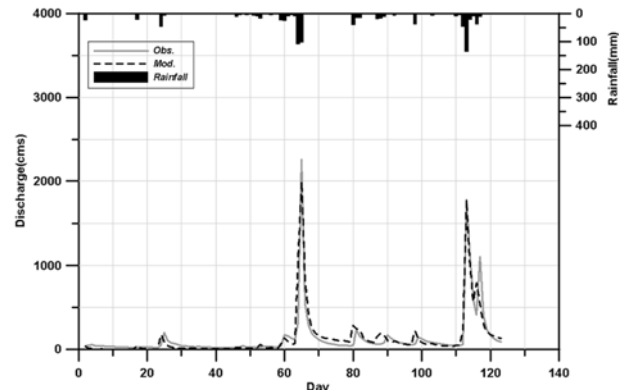


그림 5. 1999년 관측자료와 모형예측 결과의 비교(R² = 0.848)

다. 대상 전체기간인 1984년부터 2003년까지의 비교 결과는 그림 6과 같다. 이를 통하여 결정계수가 0.5이상인 양호한 자료를 가진 연도는 1998년, 1999년, 2000년, 2001년, 2002년, 2003년임을 알 수 있다. 즉, 영월2 관측소의 경우 18년간의 자료 중에서 6년 정도인 약 33% 자료만이 양호한 상태를 나타낸다.

판운 관측소의 경우에는 1993년부터 2003년의 10년간 자료가 가용하다. 앞의 경우와 동일한 방법으로 수행한 결과는 그림 7 및 8과 같다. 앞의 영월 2 관측소의 경우보다 관측 유출의 정도가 떨어지는 것으로 확인되었으며, 아울러 결정계수가 0.5 이상인 경우도 1996년과 1998년뿐으로 전체의 20%에 불과하다.

마지막으로 주천 관측소의 경우에는 1982년부터 1989년, 1995년부터 2001년의 15년간 자료가 가용하다. 역시 앞에서와 동일한 방법으로 관측자료를 검토한 결과는 그림 9 및 10과 같다. 그림 9와 같이 1998년의 관측유량에 대한 검토

에서는 침투유량과 기저유량이 비교적 잘 모의됨을 확인할 수 있으며, 전체기간 중 결정계수가 0.5이상으로 파악되는 년도가 1986년, 1989년, 1996년, 1997년, 1998년, 2001년으로 약 40%이상에 이르는 것으로 확인되었다.

4.2 각 관측소 관측유량의 평가 및 보완 결과

앞서 살펴본 3개 지점 이외에 본 연구에서는 9개 지점에 대한 추가의 분석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 표 6 과와 같다.

표 6에 나타난 것과 같이, IHACRES 모형의 매개변수를 산정하여 각 관측소별 적용한 결과 관측소별 자료가 양호한 결과를 보이는 관측소가 있는 반면에 그렇지 못한 결과를 보이는 관측소도 있었다. 거운관측소의 경우 관측자료가 2년밖에 없어 유출을 예측해 보는 정도로 그칠 수 밖에 없었으며, 영월관측소의 경우는 관측자료 중 15%, 영월2 관측소의 경

우 관측자료 중 33%, 이목정 관측소의 경우는 관측자료 중 30%, 장평교 관측소의 경우 관측자료 중 45%, 백옥포 관측

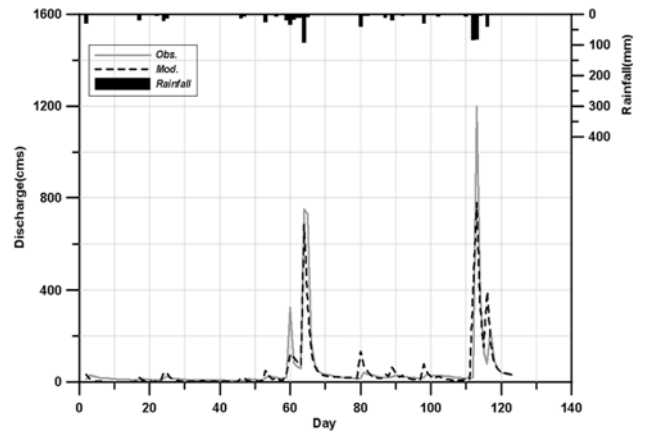


그림 7. 1999년 관측자료와 모형예측 결과의 비교($R^2 = 0.746$)

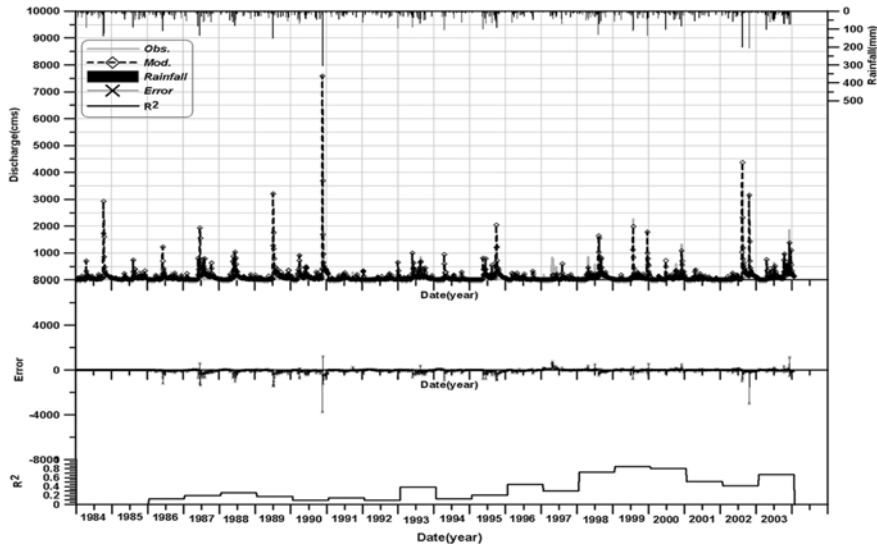


그림 6. 영월2 관측소의 유량평가 및 미계측 유량예측

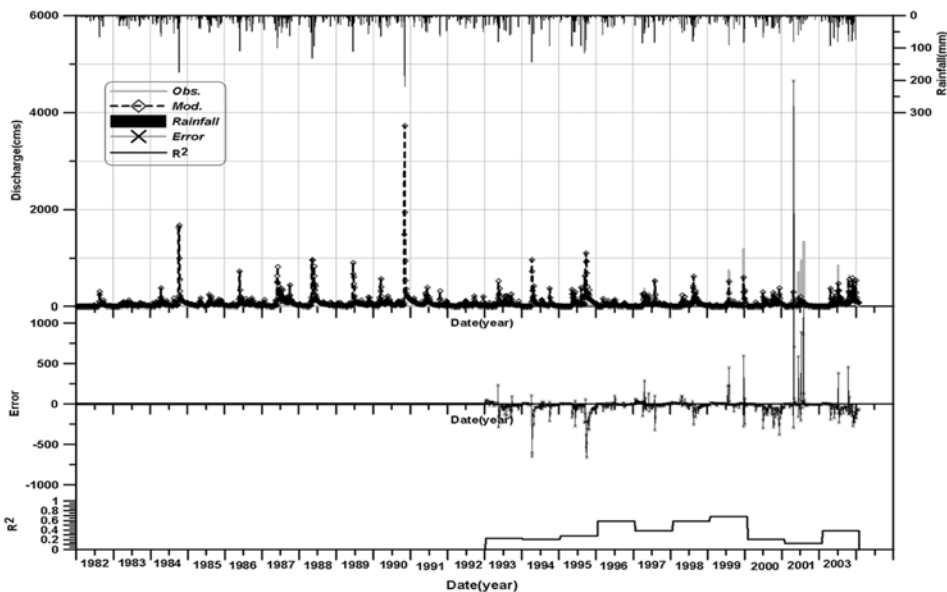


그림 8. 판운관측소의 유량평가 및 미계측 유량예측

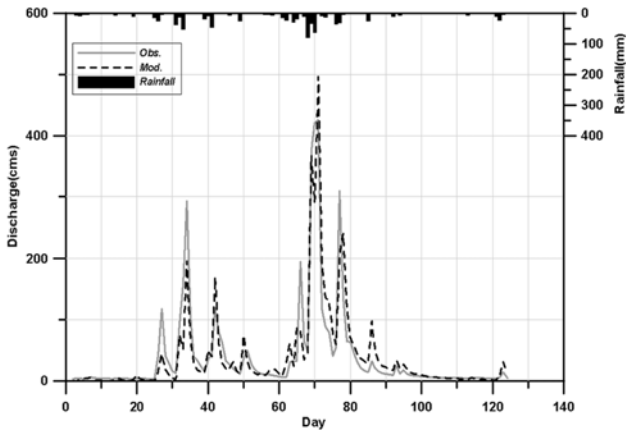


그림 9. 1998년 관측자료와 모형예측 결과의 비교($R^2 = 0.829$)

소의 경우 관측자료 중 15%, 상안미 관측소의 경우 관측자료 중 60%, 방림교 관측소의 경우 관측자료 중 45%, 판운 관측소의 경우 관측자료 중 20%, 영월 1관측소의 경우 관측자료 중 69%, 주천 관측소의 경우 관측자료 중 40%가 결정계수가 0.5이상인 양호한 관측자료 임을 알 수 있다. 이처럼 관측소별로 자료의 신뢰도가 많이 낮음을 알 수 있었으며, 관측소별로 신뢰도가 다르게 나타남을 알 수 있었다. 특히, 상안미, 영월 1관측소의 경우는 양호한 자료가 많아 관리가 잘 되어왔다는 것을 추측해 볼 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 IHACRES 모형을 이용하여 충주댐 유역

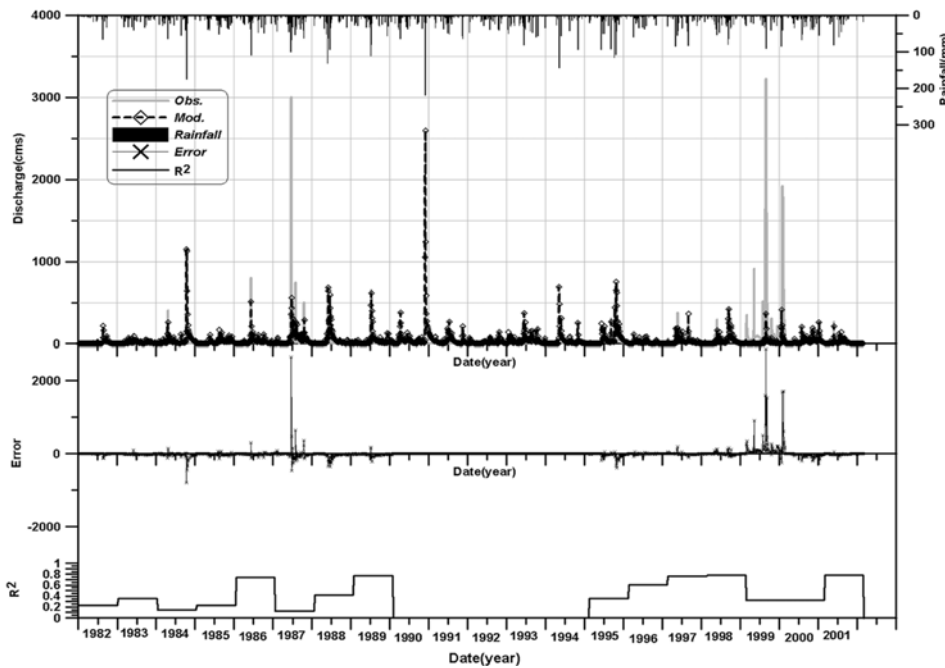


그림 10. 주천 관측소의 유량평가 및 미계측 유량예측

표 6. 각 관측소별 관측유출 평가 결과

관측소	가용 관측기록 년도	R squared > 0.5	비율(%)
거운	1984,1985	1984, 1985	-
정선2	1984-1988, 2001, 2002	1984, 2001, 2002	42
영월	1982-1995, 2003	1984, 1986	15
영월1	1986, 1987, 1993-2003	1987, 1993, 1996-2002	69
영월2	1986-2003	1998-2003	33
이목정	1982-2001	1988-1990, 1993-1995	30
장평교	1982-2001	1984, 1987, 1989-1991, 1996, 1998-2000	45
백옥포	1982-2001	1998-2000	15
상안미	1981-2001	1982, 1984, 1986, 1987, 1990, 1991, 1993, 1994, 1997, 1998, 2000, 2001	60
방림교	1982-1002	1982, 1986, 1987, 1989-1991, 1996, 1998, 1999	45
판운	1993-2003	1996, 1998	20
주천	1982-1985, 1995-2001	1986, 1989, 1996-1998, 2001	40

내 12개 지점(정선2, 거운, 영월2, 영월, 이목정, 장평교, 백옥포, 상안미, 하반정, 방림, 판운, 주천, 영월1 수위관측소)에 대한 관측유량자료에 대한 평가를 수행하였다. 특히, IHACRES 모형의 매개변수 중 지형특성 관련 매개변수를 지역화 기법을 이용하여 정량화할 수 있고, 이를 대상유역인 충주댐 유역의 여러 수위 관측지점에 적용하는 과정을 함께 수행하였다. 기후특성을 반영하는 매개변수의 경우는 기존 연구사례들을 비교 평가한 연구의 결과에 근거하여 결정할 수 있다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) IHACRES 모형의 매개변수 중 기후특성을 반영하는 매개변수인 c , τ_w^0 , f 는 기존연구의 결과에 근거하여 적절히 추정될 수 있음을 확인하였다. 즉, 우리나라의 기후특성을 고려하면 매개변수 c 는 0.0045~0.0125의 값을, 매개변수 τ_w^0 는 6~15의 값을, 매개변수 f 는 0.5~1.5의 값을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 제시된 값의 정확도를 판단해보기 위하여 중간값을 적용하였으며, 그 결과 충주댐 유역의 유출특성을 잘 반영함을 확인할 수 있었다.
- (2) IHACRES 모형의 지형특성 매개변수인 t_q , t_s , v_s 는 지형특성인자인 유역면적, 유로연장, 하천경사, 유역경사와의 회귀분석을 통한 지역화를 통해 적절히 추정할 수 있음을 확인하였다. 특히, 이들 매개변수의 불확실성이 기후특성 매개변수보다 크에도 불구하고, 아울러 최적화 기법에 근거하여 추정된 매개변수의 변동성도 상당히 크에도 불구하고 추정된 회귀식의 정도는 매우 높은 것으로 확인되었다. 이는 충주댐의 유입량을 모의한 결과에서도 확인되었다.
- (3) 유역에 대해 일관되게 적용된 기후특성 매개변수와 지형특성을 고려하여 각각 추정된 지형특성 매개변수를 이용하여 충주댐 유역 내 12개 수위관측지점에 대한 관측유량을 평가하였다. 그 결과 상안미, 영월 1 지점의 유량 자료가 상대적으로 정도가 높은 것으로 확인되었고, 영월, 백옥포, 판운 지점의 경우는 유출자료의 품질이 상대적으로 낮은 것으로 파악되었다. 전체적으로 보면 고려된 12개 지점의 관측품질에 많은 차이가 확인되며, 따라서 보다 일관된 관측품질의 확보를 위한 방안의 마련이 시급함을 판단할 수 있었다.
- (4) 본 연구를 통하여 IHACRES 모형을 이용하여 우리나라의 기후특성에 따른 기후매개변수를 확인하고, 각 지역특성을 이용한 매개변수를 확인할 수 있었다. 이 매개변수를 활용하여 역으로 미계측 유역의 유출 모의, 기 관측된 유량자료의 평가, 결측 및 오측된 유량자료 부분의 보완 등 다양한 목적에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 특히 모형의 매개변수를 기후특성 및 지형자료를 이용한 적절한 지역화 과정을 통해 결정할 수 있다는 큰 장점이 있다. 향후 기후변화에 따른 기후특성 매개변수의 결정방안이 제시된다면 미래 홍수 유출의 특성변화를 살펴보는 데에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

김광천 (2006) 국내 5대강 수계의 수문요소 변동성 분석, 석사학위논문, 세종대학교.

김석규, 김철 (2003) Tank 모형의 매개변수와 유역특성과의 상관 분석. *대한토목학회 학술발표회논문집*, 대한토목학회, pp. 2101-2186.

배현웅 (2004) (SAS와 함께하는) 통계이론과 자료분석. 교우사. 수자원종합정보 <http://www.wamis.go.kr>.

조복희, 정일원, 배덕효 (2004) PRMS 모형의 매개변수 지역화에 관한 연구. *대한토목학회 학술발표회논문집*, 대한토목학회, pp. 743-747.

홍중선 (2000) SAS와 통계자료분석. 탐진.

Acreman, M.C. (1985) Predicting the Mean Annual Flood from Basin Characteristics in Scotland. *Hydrological Sciences*, Vol. 30, No. 1, pp. 3.

Acreman, M.C., and Sinclair, C.D. (1986) Classification of Drainage Basins according to the Physical Characteristic; an Application for Flood Frequency Analysis in Scotland. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol 84, pp. 365-380.

Ando, Y. (1990) Regionalization of Parameters Using Basin Geology, Land Use and Soil Type for Use in a Storm Rainfall-Runoff Relationship. *Regionalization in Hydrology*, IAHS, Vol. 191, pp. 211-218.

Blöschl, G., and Sivapalan, M. (1995) Scale Issues in Hydrological Modelling-a Review. *Hydrological Sciences Bulletin*, ASCE, Vol. 9, pp. 251-290.

Burn, D.H. (1990) An Appraisal of the 'Region of Influence' Approach to Flood Frequency Analysis. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 35, No. 2, pp. 149-165.

Burn, D.H., and Boorman, R.D. (1993) Estimation of Hydrological Parameters at Ungauged Catchment. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol 143, pp. 429-454.

Croke, B.F.W., Jakeman, A.J., and Merritt, W.S. (2004) A Dynamic Model for Predicting Hydrologic Response to Land Cover Changes in Gauged and Ungauged Catchments. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 291, pp. 115-131.

Heerdegen, R.G., and Reich, B.M. (1974) Unit Hydrographs for Catchments of Different size and Dissimilar Regions. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 22, pp. 143-153.

Jakeman, A.J., and Hornberger, G.M. (1993) How Much Complexity is Warranted in a Rainfall-Runoff Model. *Water Resources Research*, ASCE, Vol. 29, pp. 2637-2649.

Jakeman, A.J., Hansen D.P, Ye, W., Cooke R., and Sharma, P. (1996) Analysis of the Effect of Rainfall and Streamflow Data Quality and Catchment Dynamics on Streamflow Prediction Using the Rainfall-Runoff Model IHACRES. *Environmental software*, ASCE, Vol. 11, pp. 193-202.

Kokkonen, T.S., Jakeman, A.J., Young, P.G., and Koivusalo, H.J. (2003) Predicting Daily Flows in Ungauged Catchments Model Regionalisation from Catchment Descriptors at Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes*, ASCE, Vol. 17, pp. 2219-2238.

Kshirsagar, M.M., Rajgopalan, B., and Lall, U. (1995) Optimal Parameter Estimation for Muskingham Routing with Ungauged Lateral Inflow. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 169, pp. 25-35.

Mimikou, M., and Gordios, J. (1989) Predicting the Mean Annual Flood and Flood Quantiles for Engauged Catchments in Greece. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 169-184.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part 1 - a Discussion of Principles. *Journal*

- of Hydrology*, ASCE, Vol. 121, pp. 282-290.
- Nathan, R.J., and McMahon T.A. (1990) Identification of Homeogeneous Regions for the Purpose of Regionalisation. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol 121, pp. 217-238.
- Nathan, R.J., and McMahon, T.A. (1992) Estimating Low Flow Characteristics in Ungauge Catchments. *Water Resource Management*, Vol. 6, pp. 85-100.
- Pandey, G.R., and Nguyen, V.T.V. (1999) A Comparative Study of Regression Based Methods in Regional Flood Frequency Ananlysis. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 225, pp. 92-101.
- Pilgrim, D.H. (1983) Some Problems in Transferring Hydrological Relationships between Small and Large Drainage Basin and between Regions. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol 65, pp. 49-72.
- Post, D.A., and Jakeman, A.J. (1996) Relationships between Catchment Attributes and Hydrological Response Characteristics in Small Australian Mountain Ash Catchments. *Hydrological Process*, Vol. 10, pp. 877-892.
- Post, D.A., and Jakeman, A.J. (1999) Predicting the Daily Streamflow of Ungauged Catchments in SE Australia by Regionalising the Parameters of a Lumped Conceptual Rainfall-Runoff Model. *Ecological Modelling*, Vol. 123, pp. 91-104.
- Reimers, W. (1990) Estimating Hydrological Parameters from Basin Characteristics for Large Semiarid Catchment. *Regionalization in Hydrology*, IAHS, Vol. 191, pp. 187-194.
- Sefton, C.E.M., and Howarth, S.M. (1998) Relationships between Dynamic Response Characteristics and Physical Descriptors of Catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 211, pp. 1-16.
- Tasker, G.D. (1982) Comparing Methods of Hydrologic Regionalization. *Water Resources Bulletin*, Vol. 18, pp. 965-970
- Tung, Y.K., Yeh, K.C., and Yang, J.C. (1997) Regionalization of Unit Hydrograph Parameters. 1. Comparison of Regression Analysis Techniques. *Stochastic Hydrology & Hydraulics*, Vol. 11, pp. 145-171.
- Vandewiele, G.L., and Elias, A. (1995) Monthly Water Balance of Ungauged Catchments Obtained by Geographical Regionalisation. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 170, pp. 277-291.
- Waylen, P.R., and Woo, M. (1984) Regionalization and Prediction of Floods in the Fraser River Catchment, British Columbia. *Water Resources Bulletin*, Vol. 20, No. 6, pp. 941-949.
- Zrinji, Z., and Burn, D.H. (1994) Flood Frequency Analysis for Ungauged Sites Using a Region of Influence Approach. *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 153, pp. 1-21.

◎ 논문접수일 : 2007년 11월 30일
 ◎ 심사의뢰일 : 2007년 12월 06일
 ◎ 심사완료일 : 2008년 08월 05일