

미계측 유역의 유황곡선 산정을 위한 지역회귀모형의 개발

이태희* · 이민호** · 이재응***

Lee, Tae Hee*, Lee, Min Ho**, Yi, Jaeeung***

Development of Regional Regression Model for Estimating Flow Duration Curves in Ungauged Basins

ABSTRACT

The objective of this study is to develop the regional regression models based on the physiographical and climatological characteristics for estimating flow duration curve (FDC) in ungauged basins. To this end, the lower sections with duration from 185 to 355 days of FDCs were constructed from the 16 gauged streamflow data, which were fitted to the two-parameter logarithmic type regression equation. Then, the parameters of the equation were regionalized using the basin characteristics such as basin area, basin slope, drainage density, mean annual precipitation, mean annual streamflow, runoff curve number in order that the proposed regression model can be used for ungauged basin. From the comparison of the estimated by the regional regression model with the observed ones, the model with the combination of basin area, runoff curve number, mean annual precipitation showed the best performance.

Key words : Ungauged basin, Flow duration curve (FDC), Basin characteristics, Regional regression model

초록

본 연구에서는 지형 및 기상학적 인자만으로 미계측 유역의 저유량부 유황곡선을 추정할 수 있는 지역회귀모형을 개발하고자 하였다. 이를 위해서 16개 유역의 계측 자료로부터 저유량 영역(지속일수 185일에서 365일)에 대한 유황곡선을 작성하고, 이를 토대로 로그형태의 이변수 회귀모형을 구축하였다. 이 회귀모형을 미계측 유역에 적용할 수 있도록 유역면적, 유역경사, 수계밀도, 연평균강수량, 연평균유출량, 유출곡선지수 등의 유역특성인자를 이용하여 모형의 매개변수를 지역화 하였다. 개발한 지역회귀모형으로 평균갈수량, 평균저수량, 평균평수량을 추정하여 관측값과 비교한 결과, 유역면적, 유출곡선지수, 연평균강수량 조합으로 구성된 지역회귀모형이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

검색어 : 미계측 유역, 유황곡선(FDC), 유역특성인자, 지역회귀모형

1. 서론

수자원개발이나 관리를 위해서는 시간과 공간에 따른 유황을 파악하여야 한다. 우리나라에서 현재 사용하고 있는 유황은 하천에서 유량이나 수위의 크기를 의미하며 홍수, 풍수, 평수, 저수, 갈수로 구분하고 있다(한국수문조사연보, 국토부). 갈수량은 하천의 이수측면에서 활용되어 하천수의 공급능력을 평가하여 하천수 사용 허가량을 설정하는 기준유량으로 사용된다(Kim et al., 1996). International glossary of hydrology (WMO, 1974)에서는 갈수량을 장기간의 건기시에 하천에 흐르는 유량으로 정의하였다. 갈수량은 일반적으로 지하수, 지표수, 호소수 등의 유출로부터 발생하고 매년 같은 계절에 발생한다.

* 정회원 · 유량조사사업단 낙동강조사실 선임연구원 (Hydrological Survey Center · thlee@hsc.re.kr)

** 종신회원 · 국토교통부 금강홍수통제소 예보통제과 시설연구사 (Geum River Flood Control Office · leeminho@korea.kr)

*** 종신회원 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수 (Corresponding Author · Ajou University · jeyi@ajou.ac.kr)

Received April 1, 2016/ revised April 18, 2016/ accepted April 29, 2016

미계측 유역(ungauged basin)의 갈수량을 추정하는 수문학적 모형 개발은 1970년대부터 국제적으로 연구의 대상이 되어 왔다. 역사적으로 이러한 수문학적 모형은 유역의 물리적 및 기상학적 특성인자를 변수로 하는 지역회귀방법을 기반으로 하고 있다.

미계측 유역에서의 평균갈수량 추정 방법으로 국내에서 주로 이용하고 있는 방법은 비유량법(Drainage area ratio method)을 이용하여 미계측 유역의 평균갈수량을 산정하고 있다. Yang et al. (2005)이 영산강 및 섬진강 지점을 대상으로 비유량법을 이용한 유량측정 및 산정방법에 대한 검토를 실시하였다. 미국 Massachusetts 주에서는 유역면적비가 0.3에서 1.5 사이일 때 이 방법을 사용할 것을 권장하였다(Ries and Friesz, 2000). 지역회귀기법(Regional regression method)은 세계적으로 많이 사용되는 방법(Smakhtin, 2001)이나 홍수량에 비해 평균갈수량에서는 제한적인 성공을 거두었다(Vogel and Kroll, 1992). Lee and Cho (1999)는 국내에서 유역면적, 평균유역경사, 기저유량 감수계수를 이용하여 미계측 산지하천 유역의 평균갈수량과 기준갈수량을 산정하는 회귀식을 제시하였으며, Cho et al. (2007)은 국내 미계측 유역의 평균갈수량 산정을 위해 비유량법과 지역회귀방법, 기저유량상관기법(Baseflow correlation method)을 국내에 적용하여 각 방법의 적용시 지침과 국내에 적합한 평균갈수량 산정방법을 제시하였다. Lee et al. (2016)은 국내 유역의 유역면적, 연평균강수량, 유출곡선지수를 이용한 미계측 유역의 평균갈수량 산정방법을 제시하고 비유량법 및 기존 지역회귀방법과의 비교를 통해 국내 미계측 유역의 적용 가능성을 검토하였다.

유황곡선(flow duration curve, FDC)은 어떤 유역의 갈수량부터 홍수량까지 하천의 전체적인 유량범위를 나타내는 가장 효율적인 방법 중의 하나로 자연 하천의 유황 평가 및 인위적인 수공구조물에 의한 유황 변화 등 하천유량의 변동성을 평가하는 대표적인 방법이다. 유황곡선을 추정하는 방법으로 Mandal and Cunnane (2009)은 아일랜드 125개 계측 유역의 자료를 이용하여 미계측 유역의 초과확률 25%에서 100% 구간의 유황곡선을 도출하여 25%, 50%, 75%, 95% 유량을 산정하였다.

본 연구에서는 기존의 미계측 유역의 평균갈수량 산정에 국한된 추정방법이 아닌 유황곡선을 추정하여 미계측 유역의 유황 특성을 분석하는데 목적이 있다. 따라서, 상류에 댐이 없거나 인위적인 유량 조절이 없는 것으로 판단되는 계측 유역(gauged basin)의 지형학적 인자 및 기후학적 인자와 유황곡선과의 상관관계로부터 미계측 유역에 대한 유황곡선을 추정하였다. 유황곡선(FDC)의 추정은 이수적인 측면에 있어 하천의 공급능력을 평가하기 위해 기준이 되는 저유량 영역으로 지속일수 하부 약 50% 부분(185일에서 365일)에 대해 추정하여 평균갈수량, 평균저수량, 평균평수량을 산정할 수 있는 다중회귀기반의 지역회귀모형을 제시하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 유황 및 유황곡선

하천의 유량은 강수량, 유역면적, 하천수계조직, 지형, 지세, 지질상태, 지표상태 등에 따라 달라질 수 있다. 강수량과 유역면적이 크면 유량도 큰 것이 원칙이며 특히 호우성의 연속강수량은 유량을 급격히 증가시킨다. 유역의 지세가 험준하면 강수가 일시에 하천에 쏘여하므로 유량이 크고, 지질이 불투수성이거나 지표수의 유하를 방해하는 초목 등이 적을수록 유량이 크다. 따라서 하천의 유황변화는 강우에 대한 유역의 반응구조를 나타내게 된다. 하천에서 시간에 따른 유황변동을 나타내는 방법에는 유량수문곡선과 유황곡선이 있다. 유량수문곡선은 유량의 월 혹은 계절적인 변동보다 발생수위 측면의 변동성에 관한 정보를 나타내고 있다(Park, 2003).

유황은 연평균유량과 전 자료기간유황으로 분석할 수 있다. 연평균유량은 1년 365일 각각에 대한 유량을 최대 유량부터 365위까지 순위를 정하고 특정 지속일수 순위의 유량을 자료기간 년수에 대한 평균을 취하여 얻어진다. 전 기간유황은 보유하고 있는 전 기간의 유황을 큰 것부터 작은 순으로 순위를 정한 후 그 초과확률의 백분율로 나타낼 때 $Q_{26.0}$ 을 풍수량, $Q_{50.7}$ 을 평수량, $Q_{75.3}$ 을 저수량 그리고 $Q_{97.3}$ 을 갈수량으로 정의한다. 미국이나 유럽에서는 확률개념을 사용하여 유황을 산정하고 있으며, 초과확률 P (%)는 Weibull의 공식에 의하여 결정한다(Fennessey and Vogel, 1990; Dingman, 1993).

우리나라에서는 초과확률보다는 지속일수로 표시한 유황분석이

Table 1. Duration and Exceedance Probability According to Flow Duration Curve

Division	Low Flow	Minimum Flow	Normal Flow	Abundant Flow	Flood Flow
Duration (day)	355	275	185	95	1 ~ 2
Exceedance probability (%)	97.3	75.3	50.7	26.0	0.3 ~ 0.5

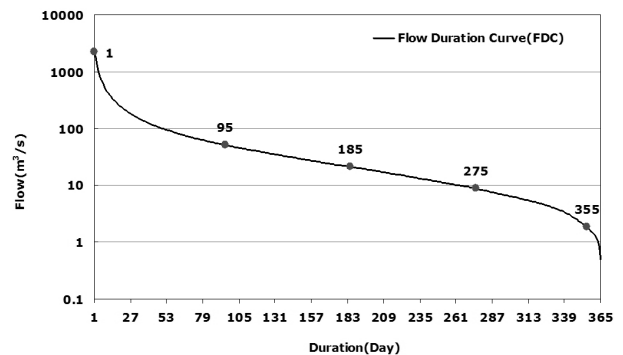


Fig. 1. FDC (Flow Duration Curve) According to Duration

보편적으로 사용되고 있다. 우리나라에서는 Table 1과 같이 지속일수를 기준으로 유황을 구분하며 갈수량 및 저수량, 평수량, 풍수량은 각각 연중 355일, 275일, 185일, 95일 이상 지속되는 유량으로 정의한다.

2.2 Mandal and Cunnane (2009)의 회귀모형

Mandal and Cunnane (2009)은 아일랜드 125개 계측 유역의 자료를 이용하여 미계측 유역의 유황곡선을 산정하고 초과확률 25%, 50%, 75%, 95% 유량을 산정하였다. 미계측 유역의 유황곡선 산정은 계측 유역의 유황곡선으로부터 대수형태의 회귀식을 도출하여 회귀식의 매개변수를 산정하는 방법이다. 매개변수를 산정하는 방법은 다음과 같은 두 가지 방법을 수행하였다.

- (i) MF (Mean Flow) 모형은 연평균유량과 매개변수 a 와의 선형관계를 다음 Eq. (1)과 같이 도출하였고

$$a = k(MF) = 0.9301(MF) \tag{1}$$

여기서 MF 는 연평균유량(m^3/s), k 는 회귀계수이다.

- (ii) AREA-SAAR 모형은 유역면적, 연평균강우량과 매개변수 a 와의 지수형관계를 다음 Eq. (2)와 같이 도출하였다.

$$a = k_1 e^{k_2 (\ln AREA)(\ln SAAR)} = 0.0229 e^{0.1393 (\ln AREA)(\ln SAAR)} \tag{2}$$

여기서 AREA는 유역면적(km^2), SAAR은 연평균강우량(mm)이고 k_1, k_2 는 회귀계수이다.

3. 유황곡선 산정 지역회귀모형의 개발

3.1 지역회귀모형의 방법론

본 연구에서는 초과확률 개념이 아닌 우리나라에서 보편적으로 사용되고 있는 지속일수에 대한 유황분석 개념으로 접근하였다. 이러한 이유는 그 개념에 대한 이해가 용이하고 기준갈수량 설정을 위한 갈수해석에 유효하게 사용될 수 있기 때문이다. 따라서 새로운 갈수량 산정방법 개발을 위해서 유황곡선의 홍수량 및 풍수량 기간은 연구범위에서 제외하고 갈수해석에 중요한 저유량 영역인 Fig. 2의 지속일수 185일(평수량) 이상 영역에 대해 분석을 실시하였다. 또한 Mandal and Cunnane (2009)의 방법을 우리나라 계측 유역 자료를 적용하여 우리나라에 적합하게 매개변수를 지역화하였으며, 더 많은 유역특성인자를 적용하여 새로운 지역회귀모형을 개발하였다.

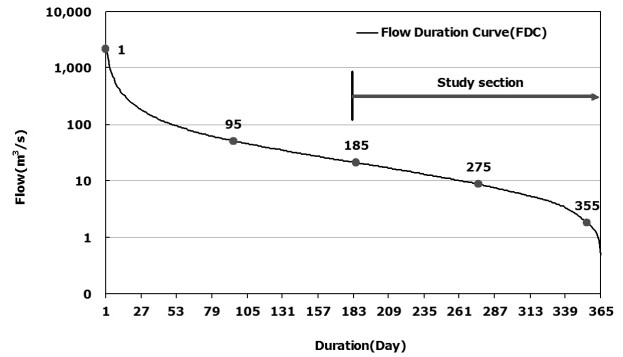


Fig. 2. Study Section of FDC

3.1.1 대상 유역 및 분석 자료

본 연구에서 적용할 대상유역으로 신뢰성 있는 유량자료 확보가 가능한 12개 다목적 댐과 4개 용수댐 유역을 선정하였다. 강우량 및 유량자료는 모형 개발에 직접적으로 필요한 자료로 댐운영실무 편람(K water, 2014) 및 한국수자원공사(www.kwater.or.kr)에 수록된 자료를 활용하였으며, 수집된 유량 자료는 상류에 댐이 없거나 인위적인 유량 조절이 없는 댐 유입량자료로 자연유황 분석에 있어서 적절한 유량자료로 판단된다. 자료누적기간은 1974년부터 2015년까지의 자료를 이용하여 최소 13년에서 최대 41년이며 유역면적은 최소 $49 km^2$ 에서 최대 $6,648 km^2$ 으로 소유역에서 중유역 규모의 유역크기를 보이고 있다. 유역경사 및 수계밀도는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에 제시된 자료를 활용하였다. 유출곡선지수는 농촌진흥청의 토양분류기준에 따른 수치 정밀토양도와 환경부의 토지이용 및 피복상태를 분류한 중분류 수치토지피복도를 활용하여 국토교통부에서 제시한 국내 토지이용현황 및 수문학적 토양군에 따라 산정하였다. 수집된 각 댐 유역의 자료 보유기간 및 유역특성인자인 유역면적(km^2), 연평균강수량(mm), 유출곡선지수 CN, 유역경사 S, 수계밀도 D를 Table 2에 정리하였다.

3.1.2 지역회귀모형의 제안

미계측 유역의 갈수해석에 필요한 지속일수 185일(평수량) 이상의 유황곡선을 산정하기 위해 Table 2에 제시된 계측 유역의 자료를 이용하였다. 각 댐 유역별 전 기간의 유입량 자료와 각 당해 연도의 유량을 내림차순으로 정리하고 지속일수에 따라 평균하여 산정한 유황곡선을 비교하여 Fig. 3에 도시하였다.

지속일수에 따라 평균하여 정리한 유황곡선을 저유량 구간에 해당하는 185일부터 365일까지의 유황곡선을 분리하였다. 각 댐 유역 별 분리한 유황곡선으로부터 유입량과 지속일수와의 관계를 Eq. (3)의 대수식 형태로 회귀분석하여 Fig. 4에 제시하였다.

Table 2. Characteristics of Study Basins

Basins	Years of record	No. of years	Basin area A (km ²)	Average annual precipitation R (mm)	Curve Number	Mean slope S	Drainage density D	Mean Flow (m ³ /s)
Soyanggang Dam	1974~2014	41	2,703.0	1,225.7	63.6	46.0	1.4	105.1
Chungju Dam	1986~2014	29	6,648.0	1,237.4	63.1	34.9	1.8	260.8
Hoengsung Dam	2001~2013	13	209.0	1,524.0	44.7	51.3	1.2	10.1
Andong Dam	1977~2013	37	1,584.0	1,151.9	55.8	42.4	3.3	57.9
Imha Dam	1993~2013	21	1,361.0	1,003.6	59.5	40.4	2.9	43.3
Hapcheon Dam	1989~2013	25	925.0	1,334.4	54.3	34.9	3.6	39.1
Namgang Dam	1976~2013	38	2,285.0	1,519.0	65.0	40.4	3.0	110.1
Miryang Dam	2001~2013	13	103.5	1,474.8	51.9	52.0	1.9	4.5
Yongdam Dam	2001~2013	13	930.0	1,426.0	59.3	43.4	2.3	42.1
Seomjingang Dam	1975~2013	39	763.0	1,324.0	65.2	37.9	1.6	32
Buan Dam	1997~2013	17	59.0	1,393.0	61.0	46.9	2.9	2.6
Boryeong Dam	1998~2013	16	163.6	1,431.0	62.0	40.2	1.6	7.4
Gwangdong Dam	1989~2013	25	125.0	1,290.2	68.4	47.8	2.2	5.1
Unmun Dam	1995~2013	19	301.3	1,243.3	72.2	48.6	2.2	11.9
Daeam Dam	2000~2015	16	77.0	1,379.3	57.1	36.8	3.3	3.4
Sueo Dam	1996~2015	20	49.0	1,736.4	61.2	51.2	2.4	2.7

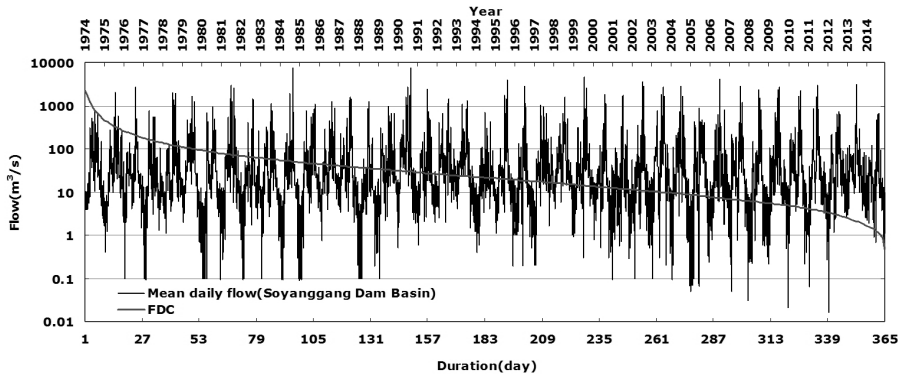


Fig. 3. Comparison of Mean Daily Flow and FDC of Each Basin (ex. Soyanggang Dam)

$$Q_{day} = a + b \ln(day) \quad (3)$$

16개 댐 유역의 지속일수 185일 이상에 대해 회귀분석하여 Fig. 4로부터 얻어진 매개변수 a 와 b 를 Table 3에 정리하였다. 각 댐 유역별 유황곡선을 회귀분석하여 도출된 Eq. (3)의 매개변수 a 와 b 의 관계는 Fig. 5에 도시한 바와 같이 결정계수(R^2)가 0.999 이상으로 매우 높은 상관관계가 나타났고 관계식은 Eq. (4)와 같다.

$$b = -0.1662a \quad (4)$$

Eq. (3)의 대수형 회귀식으로부터 산정된 추정치의 정확도를

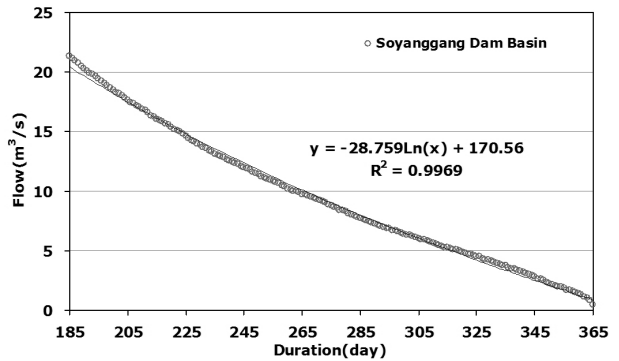


Fig. 4. Fitted Log-Model to an Empirical FDC (ex. Soyanggang Dam)

Table 3. Parameter of Regression Equation for Each Basin

Basins	Basin area A (km ²)	a	b	Note
Soyanggang Dam	2,703.0	170.560	-28.759	multipurpose
Chungju Dam	6,648.0	396.070	-65.720	multipurpose
Hoengsung Dam	209.0	12.332	-2.076	multipurpose
Andong Dam	1,584.0	81.632	-13.560	multipurpose
Imha Dam	1,361.0	38.857	-6.518	multipurpose
Hapcheon Dam	925.0	46.357	-7.599	multipurpose
Namgang Dam	2,285.0	132.640	-21.760	multipurpose
Miryang Dam	95.4	4.843	-0.816	multipurpose
Yongdam Dam	930.0	61.193	-10.200	multipurpose
Seomjingang Dam	763.0	36.354	-6.177	multipurpose
Buan Dam	59.0	1.705	-0.291	multipurpose
Boryeong Dam	163.6	5.925	-1.012	multipurpose
Gwangdong Dam	125.0	5.397	-0.913	water
Unmun Dam	301.3	15.626	-2.662	water
Daeam Dam	77.0	3.570	-0.590	water
Sueo Dam	49.0	4.900	-0.823	water

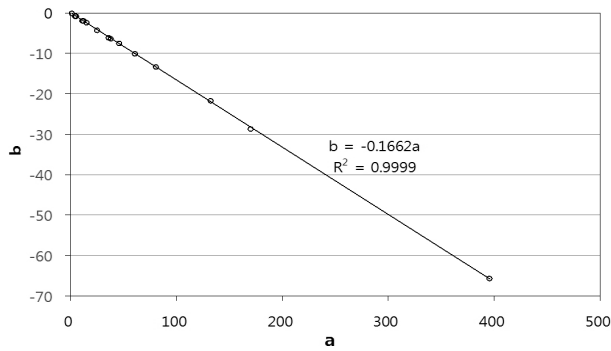


Fig. 5. Correlation Between Parameters a and b

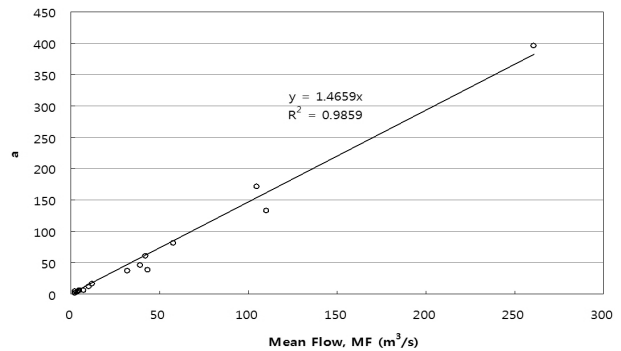


Fig. 6. Regression of Parameters a on MF

평가하기 위한 분석 방법에서는 BIAS 및 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 결정계수(coefficient of determination, R^2) 세 지표 통계량을 산정하여 정확도 평가를 수행하였다.

3.2 MF 모형의 개발

3.2.1 매개변수 지역화

MF (Mean Flow) 모형은 매개변수 a와 연평균유량 MF와의 회귀분석 결과 결정계수 R^2 값은 0.986으로 좋은 상관관계가 나타났고 관계식은 Eq. (5)와 같다.

$$a = k(MF) = 1.4659(MF) \quad (5)$$

여기서 $MF(m^3/s)$ 는 연평균유량, k는 회귀계수이다.

개념적으로 연평균유량 MF는 유역면적 A와 연평균강우량 MAR (Mean Annual Rainfall)과 다음 Eq. (6)과 같은 관계를 가질 수 있다.

$$MF = A \times MAR \quad (6)$$

3.2.2 모형의 평가

MF (Mean Flow) 모형의 연평균유량 MF와 매개변수 a와의 상관관계로부터 도출된 Eq. (6)을 이용한 추정치와 관측치를 비교하였다. 연평균유량 MF로부터 개발된 회귀식은 통계량 지표에 있어서 정확도가 높은 것으로 나타났으며 미계측 유역의 평균값수

Table 4. Accuracy of MF Model

Factor	BIAS			RMSE			R ²		
	Q _{est} (355)	Q _{est} (275)	Q _{est} (185)	Q _{est} (355)	Q _{est} (275)	Q _{est} (185)	Q _{est} (355)	Q _{est} (275)	Q _{est} (185)
MF	-0.302	-0.571	-0.790	0.699	0.896	1.422	0.911	0.983	0.988

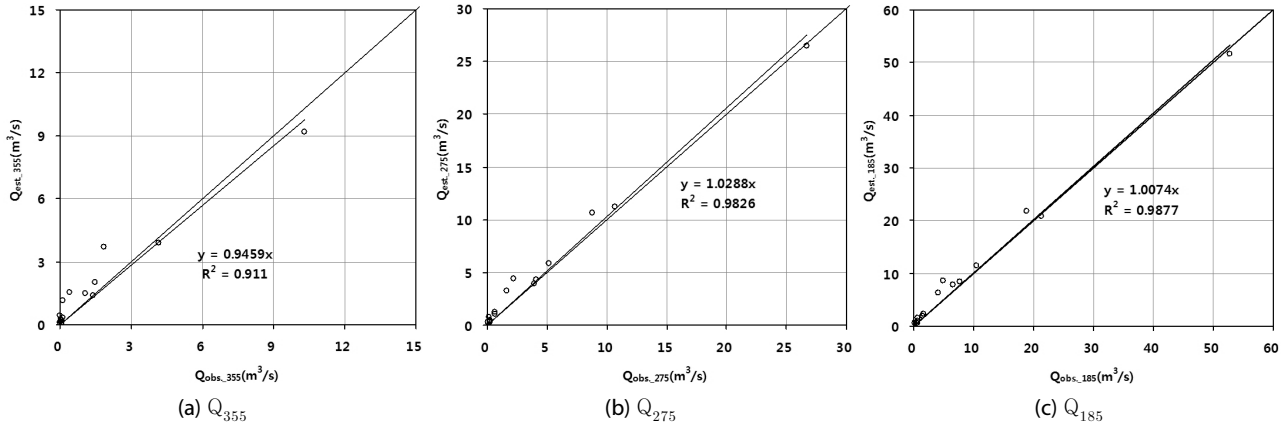


Fig. 7. Cross-Validation of MF (Mean Flow) Model: Estimated vs. Observed Values

량, 평균저수량 및 평균평수량 산정 결과 양호한 추정치가 산정된 것으로 판단된다. 지속일수 355일에 해당하는 평균갈수량, 275일에 해당하는 평균저수량과 185일에 해당하는 평균평수량을 산정치의 추정정확도를 Table 4에 정리하였다. Fig. 7에는 MF 모형을 통하여 산정된 평균갈수량, 평균저수량 및 평균평수량 추정치와 관측치의 1:1 정확도 비교를 실시하였다.

3.3 AREA-CN-SAAR 모형의 개발

3.3.1 매개변수 지역화

AREA-CN-SAAR 모형은 유황에 영향을 미치는 유역특성인자 중 유역면적 A, 전 기간연평균강수량 R과 매개변수 a와의 회귀결과 도출된 AREA-SAAR 모형과 추가로 유역유출특성을 반영하는 유출곡선지수 CN을 포함하여 회귀분석한 AREA-CN-SAAR 모형을 제시하였다. 각 모형별 매개변수 a와 지수형 관계를 나타내어 Fig. 8에 제시하였다.

AREA-SAAR 모형은 매개변수 a에 대한 유역면적 A와 전 기간연평균강수량 R과의 회귀분석 결과 Eq. (7)과 같이 도출되었고,

$$a = k_1 e^{k_2 (\ln A)(\ln R)} = 0.1108 e^{0.1252 (\ln A)(\ln R)} \quad (7)$$

AREA-CN-SAAR 모형은 매개변수 a에 대한 유역면적 A와 전 기간연평균강수량 R 및 유출곡선지수 CN과의 회귀 결과 Eq. (8)과 같이 도출되었다.

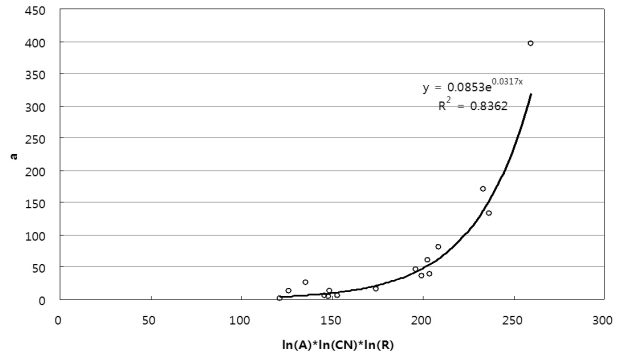
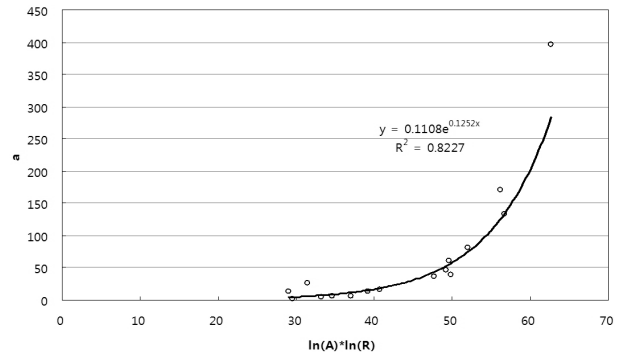


Fig. 8. Regression of Parameter a on AREA-CN-SAAR

$$a = k_1 e^{k_2 (\ln A)(\ln CN)(\ln R)} = 0.0853 e^{0.0317 (\ln A)(\ln CN)(\ln R)} \quad (8)$$

결정계수 R^2 값을 비교하면 유역면적 A와 전 기간연평균강수량 R과의 관계에서 0.823, 유역면적 A와 전 기간연평균강수량 R 및 유출곡선지수 CN과의 관계에서 0.836으로 비슷한 상관관계가 도출되었다.

3.3.2 모형의 평가

AREA-CN-SAAR 모형은 유역특성인자 중 유역면적 A, 전 기간연평균강수량 R로 구성된 Eq. (7)의 AREA-SAAR 모형과 유역면적 A, 전 기간연평균강수량 R, 유출곡선지수 CN으로 구성된 Eq. (8)의 AREA-CN-SAAR 모형으로 산정된 추정치를 비교하였다.

AREA-SAAR 모형과 유출곡선지수를 추가로 구성한 AREA-CN-SAAR 모형에서 산정된 각 추정치를 비교한 결과 수치적 미세한 차이로 AREA-CN-SAAR 모형이 통계량 지표에 있어서 정확도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 유역면적 A, 전 기간연평균강수량 R, 유출곡선지수 CN을 인자로 하는 AREA-CN-SAAR 모형이 유역의 유출특성을 반영하여 좀 더 정확한 추정이 이루어질 것으로 판단된다.

Table 5에는 유역면적, 전 기간연평균강수량으로 구성된 AREA-SAAR 모형과 유역면적, 전 기간연평균강수량, 유출곡선지수로 구성된 AREA-CN-SAAR 모형별 산정된 평균강수량, 평균저수량

및 평균평수량의 정확도를 비교하여 정리하였다. Fig. 9에는 추정정확도가 우수한 AREA-CN-SAAR 모형을 이용하여 산정된 추정치와 관측치의 1:1 정확도 비교를 실시하여 도시하였다.

3.4 다중회귀기반 지역회귀모형의 개발

3.4.1 매개변수 지역화

다중회귀기반 지역회귀모형(Region Regression Model)은 인위적인 유량조절의 영향이 없는 자연하천에서 유황의 영향을 미치는 지형학적 인자와 기후학적 인자를 적용하였다. 매개변수 a 와 유역면적 A, 전 기간연평균강수량 R, 유출곡선지수 CN, 유역경사 S, 수계밀도 D 등 각 유역 특성인자를 조합하여 Eq. (9)와 같이 지수식의 형태로 나타내었다. 각 유역의 특성인자와의 관계로부터 도출된 지수식의 변수 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 를 산정하면 Table 6에 제시된 바와 같으며, 상관관계는 최소 0.991부터 최대 0.996로 만족스러운 결과를 보이고 있다.

$$a = \alpha A^\beta B^\gamma C^\delta \quad (9)$$

Eq. (2), (5), (9)를 연립하여 유황곡선식으로 나타내면 Eq. (10)과 같다.

$$Q_{day} = \alpha A^\beta B^\gamma C^\delta (1 - 0.1662 \ln(day)) \quad (10)$$

Table 5. Accuracy of AREA-CN-SAAR Model

Factor	BIAS			RMSE			R ²		
	Q _{est} (355)	Q _{est} (275)	Q _{est} (185)	Q _{est} (355)	Q _{est} (275)	Q _{est} (185)	Q _{est} (355)	Q _{est} (275)	Q _{est} (185)
A, R	-0.027	0.374	0.890	1.024	2.110	4.110	0.857	0.955	0.963
A, CN, R	-0.095	0.186	0.515	0.844	1.518	2.891	0.892	0.970	0.976

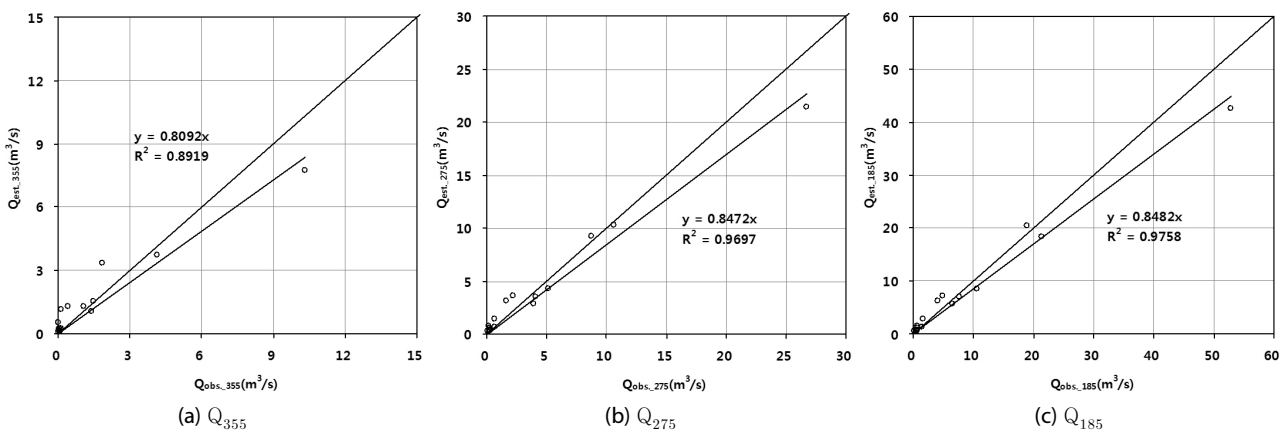


Fig. 9. Cross-Validation of AREA-CN-SAAR Model: Estimated vs. Observed Values

Table 6. Equation Factors by Cross-Validation of Basin Characteristics

A	B	C	α	β	γ	δ	R^2
A	R	CN	0.00015	1.0886	0.6494	0.1349	0.992
A	D	CN	0.00192	1.0177	-0.1727	0.8147	0.991
A	S	CN	0.00048	1.1188	0.4842	0.4952	0.992
A	D	R	0.00001	1.0360	-0.3886	1.1933	0.996
A	S	R	0.00005	1.1568	0.6687	0.4690	0.995
A	S	D	0.00285	1.1252	0.5612	-0.0983	0.992

Table 7. Accuracy of Multiple Regression-Based Regional Regression Model

Factor	BIAS			RMSE			R^2		
	$Q_{est(355)}$	$Q_{est(275)}$	$Q_{est(185)}$	$Q_{est(355)}$	$Q_{est(275)}$	$Q_{est(185)}$	$Q_{est(355)}$	$Q_{est(275)}$	$Q_{est(185)}$
A, R, CN	-0.206	-0.122	-0.097	0.626	0.729	0.966	0.933	0.988	0.995
A, D, CN	-0.217	-0.154	-0.161	0.771	1.150	1.390	0.897	0.969	0.989
A, S, CN	-0.201	-0.108	-0.071	0.751	1.081	1.279	0.903	0.973	0.990
A, D, R	-0.215	-0.148	-0.150	0.720	0.964	0.960	0.911	0.978	0.995
A, S, R	-0.204	-0.118	-0.089	0.721	0.942	0.975	0.911	0.979	0.994
A, S, D	-0.198	-0.100	-0.054	0.790	1.183	1.377	0.894	0.968	0.989

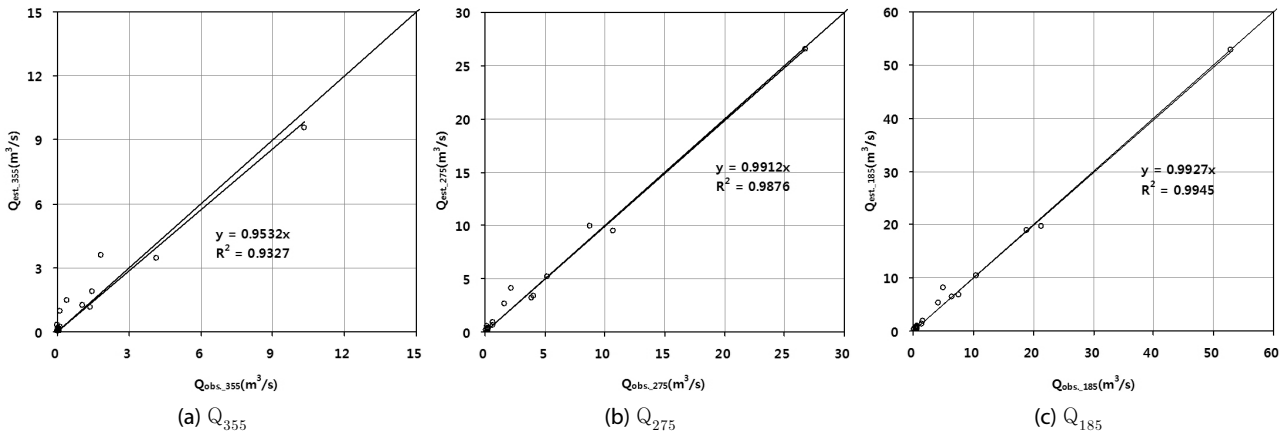


Fig. 10. Cross-Validation of Multiple Regression-Based Regional Regression Model: Estimated vs. Observed Values

3.4.2 모형의 평가

유역특성인자 유역면적 A, 유역경사 S, 수계밀도 D, 유출곡선지수 CN, 전 기간연평균강수량 R을 다중회귀기반 모형 Eq. (10)에 적용하여 교차검증을 실시하였다. 지속일수 355일에 해당하는 평균강수량 산정에 있어서 유역특성인자 중 유역면적, 유출곡선지수, 전 기간연평균강수량에 의해 회귀분석하여 산정된 추정치가 통계량 지표에 있어서 가장 정확도가 높은 것으로 나타났다. 275일에 해당하는 평균강수량의 산정에 있어서도 유역면적, 유출곡선지수, 전 기간연평균강수량에 의해 산정된 추정치가 가장 정확도가 높은 것으로 나타났다. 185일에 해당하는 평균강수량의 경우는 유역면

적, 수계밀도, 전 기간연평균강수량에 의해 산정된 추정치가 가장 정확도가 높은 것으로 나타났으나, 유역면적, 유출곡선지수, 전 기간연평균강수량 조합에 의해 산정된 추정치와 정확도 차이가 미미한 것으로 판단된다. 따라서 유역특성인자인 유역면적, 유출곡선지수, 전 기간연평균강수량 조합에 의한 모형을 적용하는 것이 미계측 유역의 평균강수량, 평균저수량 및 평균평수량 등 유출을 좀 더 정확하게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7에는 회귀분석인자 별 교차검증을 실시하여 평균강수량, 평균저수량, 평균평수량산정치에 대한 추정정확도를 비교하여 정리하였다. Fig. 10에는 추정정확도가 가장 우수한 회귀분석인자

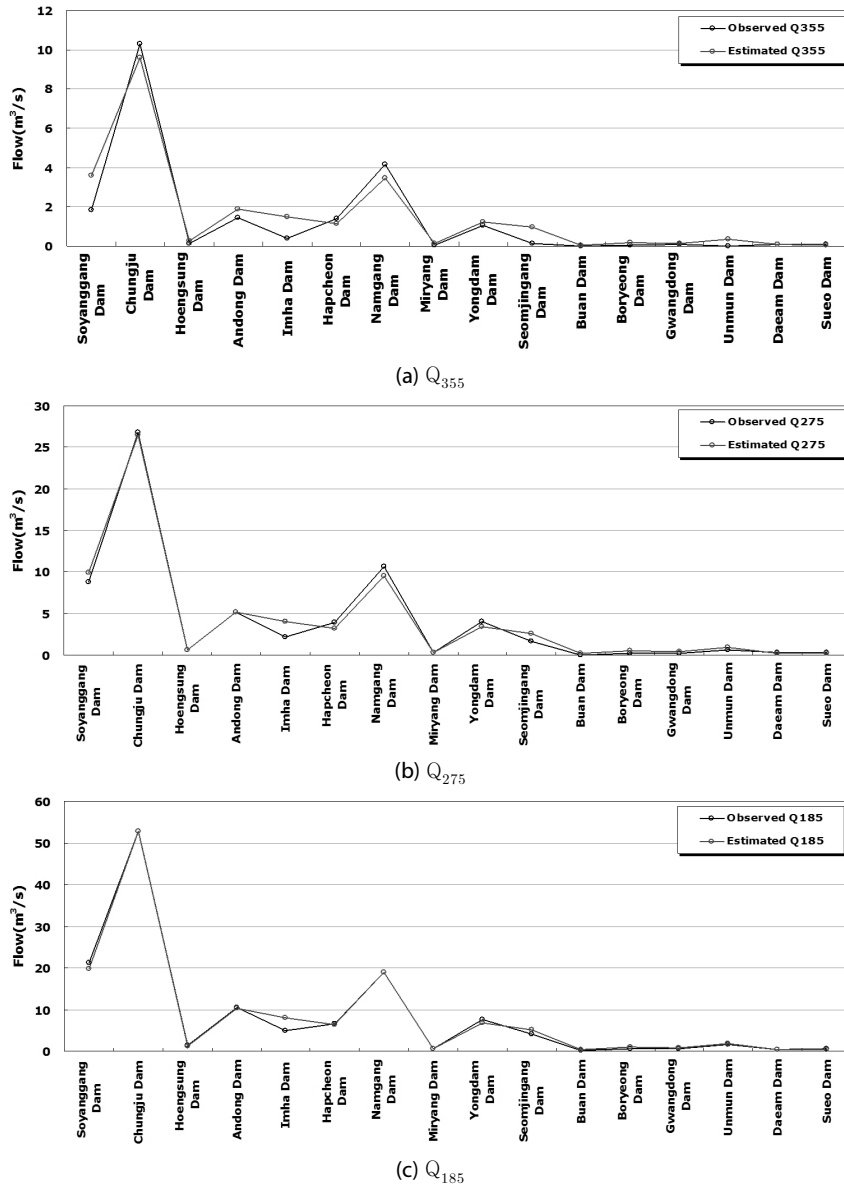


Fig. 11. Estimated and Observed Value of Each Basin by Regression Factor(A, CN, R)

A, R, CN에 의해 산정된 관측치와 추정치의 1:1 비교를 통하여 정확도 비교를 실시하였다. Fig. 11에서도 마찬가지로 통계량 지표에 있어서 가장 정확도가 높은 것으로 나타난 회귀분석인자 A, R, CN에 의해 산정된 각 유역별 평균갈수량, 평균저수량 및 평균평수량 추정치를 관측치와 비교하여 도시하였다.

3.5 지역회귀모형별 평가

미계측 유역의 평균갈수량, 평균저수량, 평균평수량 등의 추정을 위해 개발된 지역회귀모형의 적합성 판단을 위해 각 지역회귀모형과 비교를 실시하여 Table 8에 정리하였다.

평균갈수량 산정 결과 연평균유량을 인자로 하는 MF 방법은 BIAS -0.302, RMSE 0.699, 결정계수 R^2 0.911으로 산정되었다. 또한 새로운 갈수량 산정방법을 개발하기 위해 유역특성인자 중 유역면적, 유출곡선지수, 전 기간연평균강수량과 매개변수 a 와의 관계를 지수형 회귀식으로 나타낸 AREA-CN-SAAR 모형은 BIAS -0.095, RMSE 0.844, 결정계수 R^2 0.892으로 산정되었다. 여러 유역특성인자 교차 검증에 있어 유역면적, 유출곡선지수, 전 기간연평균강수량과의 회귀분석에서 가장 정확도 높은 결과를 나타낸 다중회귀기반 지역회귀모형의 경우 BIAS -0.206, RMSE 0.626, 결정계수 R^2 0.933로 산정되었다.

Table 8. Comparison of Q_{355} , Q_{275} and Q_{185} by Estimation Models (unit: m^3/s)

Basins	$Q_{obs.}(355)$	$Q_{est.}(355)$			$Q_{obs.}(275)$	$Q_{est.}(275)$			$Q_{obs.}(185)$	$Q_{est.}(185)$		
		MF model	AREA-CN-SAAR model	RRM model		MF model	AREA-CN-SAAR model	RRM model		MF model	AREA-CN-SAAR model	RRM model
Soyanggang Dam	1.85	3.71	3.34	3.63	8.77	10.67	9.24	9.90	21.30	20.78	18.40	19.70
Chungju Dam	10.31	9.20	7.74	9.57	26.74	26.49	21.39	26.50	52.86	51.59	42.58	52.75
Hoengsung Dam	0.11	0.36	0.23	0.22	0.67	1.03	0.63	0.67	1.50	2.00	1.26	1.33
Andong Dam	1.47	2.04	1.54	1.87	5.18	5.88	4.26	5.22	10.54	11.44	8.47	10.39
Imha Dam	0.42	1.53	1.31	1.51	2.20	4.40	3.62	4.08	4.97	8.57	7.21	8.13
Hapcheon Dam	1.39	1.38	1.04	1.12	3.93	3.97	2.86	3.19	6.52	7.74	5.70	6.34
Namgang Dam	4.15	3.88	3.70	3.44	10.66	11.18	10.24	9.50	18.88	21.77	20.39	18.92
Miryang Dam	0.04	0.14	0.25	0.13	0.26	0.45	0.39	0.31	0.60	0.88	0.78	0.61
Yongdam Dam	1.06	1.48	1.27	1.21	4.09	4.27	3.50	3.39	7.66	8.32	6.97	6.74
Seomjingang Dam	0.13	1.13	1.14	0.98	1.61	3.25	3.15	2.64	4.14	6.34	6.26	5.25
Buan Dam	0.01	0.09	0.10	0.06	0.05	0.26	0.27	0.17	0.22	0.52	0.53	0.33
Boryeong Dam	0.03	0.26	0.26	0.19	0.20	0.75	0.72	0.51	0.71	1.47	1.44	1.03
Gwangdong Dam	0.07	0.18	0.21	0.14	0.25	0.52	0.58	0.36	0.66	1.01	1.16	0.72
Unmun Dam	0.02	0.42	0.51	0.36	0.63	1.21	1.41	0.93	1.67	2.35	2.81	1.86
Daeam Dam	0.09	0.12	0.12	0.09	0.26	0.34	0.32	0.23	0.49	0.67	0.63	0.45
Sueo Dam	0.08	0.10	0.09	0.06	0.28	0.27	0.25	0.16	0.61	0.53	0.50	0.32
BIAS		-0.302	-0.095	-0.206		-0.571	0.161	-0.122		-0.790	0.465	-0.097
RMSE		0.699	0.844	0.626		0.896	1.521	0.729		1.422	2.896	0.966
R ²		0.911	0.892	0.933		0.983	0.970	0.988		0.988	0.976	0.995

평균저수량 산정 결과 MF 모형은 BIAS -0.571, RMSE 0.896, 결정계수 R^2 0.983으로 산정되었고 AREA-CN-SAAR 모형은 BIAS 0.161, RMSE 1.521, 결정계수 R^2 0.970으로 산정되었다. 다중회귀기반 지역회귀모형의 경우 BIAS -0.122, RMSE 0.729, 결정계수 R^2 0.988로 산정되었다. 따라서 다중회귀기반 지역회귀모형이 모든 수치에서 가장 우수한 결과를 도출했다.

평균평수량 산정 결과 MF 모형은 BIAS -0.790, RMSE 1.422, 결정계수 R^2 0.988로 산정되었고 AREA-CN-SAAR 모형은 BIAS 0.465, RMSE 2.896, 결정계수 R^2 0.976으로 산정되었다. 다중회귀기반 지역회귀모형의 경우 BIAS -0.097, RMSE 0.966, 결정계수 R^2 0.995로 산정되었다. 따라서 다중회귀기반 지역회귀모형이 모든 수치에서 가장 우수한 결과를 도출했다.

종합적인 결과 평균갈수량 산정에서 AREA-CN-SAAR 모형이 BIAS가 -0.095로 가장 낮았으며, 다중회귀기반 지역회귀모형이 RMSE가 0.626으로 가장 낮고 결정계수 R^2 이 0.933로 가장 좋은 결과를 도출했다. 평균저수량, 평균평수량에서는 다중회귀기반 지역회귀모형이 모든 수치에서 가장 우수한 결과를 도출했다. 따라서 국내 미계측 유역에 적용하여 평균갈수량, 평균저수량, 평균평수량

등 유황분석을 실시하는데 있어서 유역면적 A, 유출곡선지수 CN, 전 기간연평균강수량 R을 인자로 하는 다중회귀기반 지역회귀모형이 가장 적합하고 우수한 방법으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 16개 댐 유역의 계측자료로부터 지형과 기상 등의 인자를 매개변수로 활용하여 유황곡선을 산정하는 모델을 제시하였다.

MF 모형은 유황에 직접적인 영향을 미치는 유역면적과 연평균 강우량의 관계로부터 도출된 연평균유량과 매개변수 α 와의 회귀관계로부터 개발되었다. 따라서 갈수량, 저수량, 평수량 추정에서 정교도 높은 결과가 산출되었다.

AREA-CN-SAAR 모형은 유역면적과 연평균강수량으로 구성된 AREA-SAAR 모형에 유출곡선지수를 추가하여 구성한 모형으로 AREA-SAAR 모형으로 산정한 추정치보다 통계량 지표에 있어서 정확도가 높은 것으로 나타났다.

다중회귀기반 지역회귀모형은 유역특성인자 유역면적, 유역경사,

수계밀도, 유출곡선지수, 연평균강수량을 교차검증하여 회귀분석한 결과 유역면적, 유출곡선지수, 연평균강수량에 의해 산정된 추정치가 통계량 지표에 있어서 가장 정확도가 높은 것으로 나타났다.

종합적으로 갈수량 산정에서 AREA-CN-SAAR 모형이 BIAS가 -0.095로 가장 낮았으며, 다중회귀기반 지역회귀모형이 RMSE가 0.626으로 가장 낮고 결정계수 R^2 이 0.933으로 가장 좋은 결과를 도출했다. 저수량, 평수량에서는 다중회귀기반 지역회귀모형이 모든 수치에서 가장 우수한 결과를 도출했다. 따라서 국내 미계측 유역에 적용하여 평균갈수량, 평균저수량, 평균평수량 등 유황분석을 실시하는데 있어서 유역면적, 유출곡선지수, 연평균강수량을 인자로 하는 다중회귀기반 지역회귀모형이 가장 적합하고 우수한 방법으로 나타났다. 따라서 실제 유량관측이 곤란한 하천에서 유황곡선을 도출하여 활용이 가능하고 평저수기 하천유량관리에 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Cho, T. G., Kim, Y. O. and Lee, K. S. (2007). "Improving low flow estimation for ungauged basins in Korea." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 2, pp. 113-124 (in Korean).
- Dingman, S. L. (1993). *Physical Hydrology*, Prentice Hall.
- Fennessey, N. and Vogel, R. M. (1990). "Regional flow-duration curves for ungauged sites in Massachusetts." *Journal Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 116, No. 4, pp. 530-549.
- K water (2014). *Dam Operation Manual* (in Korean).
- K water (2016). http://www.kwater.or.kr/info/sub02/sub01/sub01/dam/hydr.do?s_mid=1332 (Accessed: February 4, 2016).
- Kim, K. H., Lee, J. W., Hong, I. P. and Woo, H. (1996). "Development of a method for determining the instream flow and its application: I. Estimation Method." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 29, No. 4, pp. 161-176 (in Korean).
- Lee, J. H. and Cho, G. T. (1999). "The development of design low-flow estimation model at the ungauged mountainous watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 169-181 (in Korean).
- Mandal, U. and Cunnane, C. (2009). "Low-Flow prediction for ungauged river catchment in Ireland." *Irish National Hydrology Seminar*, pp. 33-48.
- Park, S. D. (2003). "Dimensionless flow duration curve in natural river." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 1, pp. 33-44 (in Korean).
- Ries, K. G. and Friesz, P. J. (2000). *Methods for estimating low-flow statistics for Massachusetts streams.*, Water Resources investigations Report, U.S. Geological Survey, Northborough, Massachusetts.
- Smakhtin, V. U. (2001). "Low flow hydrology: A review." *Journal of Hydrology*, Vol. 240, pp. 147-186.
- Vogel, R. M. and Kroll, C. N. (1992). "Regional geohydrologic-geomorphic relations for the estimation of low-flow statistics." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 2451-2458.
- Water Management Information System (2016). http://www.wamis.go.kr/WKB/wkb_bsnsp_lst.aspx (Accessed: February 4, 2016).
- World Meteorological Organization (1974). *International Glossary of Hydrology*.
- Yang, H. K., Choi, H. C. and Kim, J. H. (2005). "River discharge estimation by specific discharge measurement." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 40, No. 3, pp. 274-284 (in Korean).