

기저유량비를 이용한 미계측 유역의 평균 갈수량 산정

Estimation of Average Low Flow Using Base Flow Index for Ungaged Basin

이시윤*, 김치영**, 이종소***, 김형수****

Si Yoon Lee, Chi Young Kim, Jong so Lee, Hung Soo Kim

요 지

유량자료는 연속적으로 관측하기가 쉽지 않을 뿐 아니라 모든 관측소에서 매년 적정한 유량자료를 생산하는 것 또한 매우 어려운 실정이다. 이에 따라 미계측 유역에 대한 유량 산정을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 영국의 “Low Flow Studies report(Institute of Hydrology, 1980)”에서는 갈수량 산정과 관련하여 기저유량비(Base Flow Index, BFI)를 사용하는 것을 추천하였다. 국내에서는 이와 관련한 적용 사례가 없기 때문에 본 연구에서는 BFI를 적용하여 미계측 유역의 갈수량을 산정하고자 하였다. 대상유역은 낙동강 권역의 22개 지점을 대상으로 실시하였으며, 기저유량비 및 평균 갈수량과 유역 및 수문인자들의 상관분석을 수행하였다. 분석을 통하여 기저유량비는 토양군 C와 지하수위를 독립변수로, 평균 갈수량은 기저유량비, 유역면적, 강수량을 독립변수로 선정하여 회귀분석을 실시하였다.

그 결과 개발한 기저유량비 지역회귀모형의 상대오차는 -26.5%(기계2)~57.2%(구영)의 범위로 분포하였고, 절대오차의 평균은 17.2%로 산정되었다. 평균 갈수량 지역회귀모형은 상대오차가 -38.4%(도천)~184.4%(길안)의 범위에서 분포하고 있으며, 절대오차의 평균은 47.3%이다. 그러나 소토, 기계2, 길안 지점을 제외하면 절대오차는 30.6%이다. 상대오차는 다소 부정적이지만 기존에 개발된 지역회귀모형으로 평균 갈수량을 산정한 결과와 비교하면 상대적으로 양호한 것으로 판단된다. 사용한 자료의 기간이 6년으로 통계적인 결과로 보기에는 다소 미흡한 측면이 있지만, 유역인자로서 BFI가 미계측 유역의 갈수량 특성을 설명할 수 있는 우수한 인자라고 판단하였다.

핵심용어 : 평균 갈수량, 기저유량비, 지역회귀모형, BFI

1. 서론

수위자료의 경우, 연속적으로 관측이 되어 홍수통제소 등을 통해서 실시간으로 수위자료를 취득할 수 있으나 유량자료는 연속적으로 관측이 힘들고, 이에 따라 모든 관측소에서 매년 적정한 유량자료를 생산하는 것이 매우 어려운 실정이다. 대부분의 유량자료는 수위자료와 실측 유량자료를 토대로 개발된 수위-유량관계곡선에 의해 제공되고 있으며, 이러한 수위-유량관계곡선은 각각의 수위관측소를 유역출구로 하여 수위대별 유량을 시간에 따른 총 유출량으로 측정하고, 측정된 유량들과 측정 시점의 수위들과의 관계를 회귀분석을 통하여 결정한다. 하지만 모든 관측소에서 유량측정을 실시하기는 어렵기 때문에 미계측 유역에 대해서는 여러 방법을 통해서 유량을 추정하고 있는 실정이다. 그러나 미계측 유역에 대한 유량자료는 다소 신뢰성이 떨어지는 경우가 많으며, 전 세계적으로 이를 개선하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 실무적으로 비유량법(drainage area ratio method)이 주로 사용되며, 미

* 정회원 · 유량조사사업단 한강조사실 · E-mail : leesy@hsc.re.kr
** 정회원 · 유량조사사업단 연구개발실 · E-mail : cy_kim@hsc.re.kr
*** 정회원 · 인하대학교 수자원시스템연구소 박사 · E-mail : stynrehero@naver.com
**** 정회원 · 인하대학교 사회인프라공학과 교수 · E-mail : sookim@inha.ac.kr

계측 유역의 갈수량을 산정하는 방법으로 지역회귀방법(regional regression method, RRM)에 대한 연구가 진행되고 있다.

2. 평균 갈수량 및 기저유량비 산정 방법

2.1 평균 갈수량의 정의 및 산정 방법

국내에서 갈수량은 계측 유역의 일유량 자료를 기준으로 1년을 통하여 355일은 이보다 저하하지 않는 유량을 뜻한다. 기준갈수량은 355일 이상 유지되는 매 년의 갈수량에 대하여 재현기간 10년에 해당하는 값이다(하천설계기준·해설, 국토해양부, 2009). 그러나 과거의 유량자료가 없거나 부분적으로 존재하는 미계측 유역의 경우 이러한 조사가 불가하여 다른 방법을 통하여 산정이 필요하다. 국내에서는 계측 유역과 미계측 유역의 면적의 비를 이용하여 산정하는 비유량법(Riggs, 1972; Flynn, 2003)과 수문학적 동질성을 갖는 다수의 계측 유역과 미계측 유역 간의 특성인자와 갈수량의 상관관계를 통해서 회귀모형을 산정하는 지역회귀방법(Vogel and Kroll, 1992; Smakhtin, 2001)을 적용한 바가 있다.

2.2 기저유량비의 정의 및 산정 방법

2.2.1 수문곡선의 분리

강우가 지면에 도달하여 하천에 이르는 경로에 따라 유출은 지표유출, 지표하유출, 지하수유출로 구분되지만 실무에서는 유출을 해석하기 위해 직접유출(direct runoff)과 기저유출(baseflow)로 구분한다. 직접유출과 기저유출은 통상적으로 유출수문곡선을 이용하여 분리가 된다. 이러한 분리는 목적에 따라 공학적 문제를 해결하기 위함이고, 수문곡선을 분리하는 방법으로는 주 지하수 감수곡선법, n -day법, 수정 N -day법, 수평직선 분리법, 가변경사법 등이 있다. 국내의 실무에서는 편의상 한 개의 사상에 대한 수평직선 분리법을 주로 사용하고 있다. 그러나 수문곡선 분리 방법은 하천의 유출 요소들을 추정하기 위해 다양한 컴퓨터 프로그램으로 구현되어 왔으며, 본 연구에서는 USGS에서 개발한 6개의 모듈(module)이 제공되는 GW-Toolbox를 이용하여 수문곡선의 분리를 실시하였다.

2.2.2 기저유량비의 정의 및 산정방법

기저유량비는 하천의 연간 총 유출량에 대하여 수문곡선 분리에 따라 기저유량을 제외한 연간 총 직접유출과 연간 총 기저유출량의 비율을 의미하고, 구하는 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$BFI = \frac{V_B}{V} \quad (1)$$

여기서 V_A 는 연간 총 유출량에서 V_B 를 뺀 것이고, V_B 는 수문곡선 분리에 의한 총 기저유출량이다. 기저유량비는 “Calculation of the Base Flow Index(Institute of Hydrology)”에 따라 연간 기저유량비들을 계산하기 위해 전체 기간에 대한 분리를 계산한 후에 연도별로 기저유량비를 추정하였고, 기저유량비의 평균은 전체 기간에 대하여 분리한 기저유량비의 단일한 값을 산정하였으며, 관측자료 기간에 대한 민감도가 크기 때문에 결측 기간의 보간은 최대 5일까지 실시하여 전체 자료의 2% 이상의 결측자료를 포함하지 않는 지점을 선정하였다.

3. 평균 갈수량 및 기저유량비의 상관분석

3.1 대상 유역

대상 유역의 선정은 하천 흐름이 상류 댐이나 하류 보의 지배적인 영향을 받지 않고 자연의 흐름을 잘 반영하는 지점을 선정하여야 하지만, 국내의 하천에서는 이를 적용할 수 있는 하천이 많지 않아 연속된 유량자료를 제공할 수 있는 지점을 표 1, 그림 1과 같이 우선적으로 선정하였다. 해당 유역의 관측소는 4대강 사업으로 건설된 보의 직접적인 통제를 받는 낙동강 본류는 제외하였고, 상류 댐의 방류량에 직접적인 영향을 받는 지점을 최소화하였다.

3.2 유역인자 산정 및 자료수집

미리 구축된 30m 수치표고자료(DEM)를 활용하여 래스터(raster) 및 벡터(vector)를 이용하는 ArcGIS로 공간분석을 수행하여 대상 유역의 특성인자를 산정하였다. 산정된 인자들은 유역의 특성을 나타내는 유역면적, 유역둘레, 유역평균경사, 유역평균표고와 유역 전반에 대하여 유출에 영향을 미치는 유역평균폭, 형상인자, 형상계수, 단일형상계수, 원형비, 세장률, 기복비, 상대기복, 기복수 등의 유역형상인자, 유로연장, 하상경사, 수계밀도, 하상계수, 최원유로연장, 수계유지상수, 섬세비, 유황계수 등의 하천특성인자를 산정하였다. 또한 유역내의 침투량과 손실량을 추정하고 유출량 등에 전반적인 경향 판단을 위해 국립농업과학원에서 제공하는 정밀토양도, 환경부에서 제공하는 대분류 토지피복지도의 공간 분석을 통하여 유출곡선지수(Curve Number, CN) 및 수문학적 토양군, 유사한 유역의 습윤 상태를 가리키는 지표로서 경사에 따라 물이 흐르는 방향에 직각을 만나는 단위 면적에 대한 물의 면적의 비율로 산출되는 지형습윤지수(Topographic Wetness Index or Compound Topographic Index, TWI)를 산정하였다.

표 1 대상 지점 관측소

관측소 코드	관측소명(한글)	관측소명(영어)	수계명	하천명	경도	위도
2013690	개진2	Gaejin 2	낙동강	회 천	128-20-14	35-40-44
2101625	경주2	Gyeongju 2	형산강	형산강	129-12-06	35-50-17
2201653	구 명	Gooyoung	태화강	태화강	129-14-55	35-33-41
2101668	기계2	Gigy 2	형산강	기계천	129-14-18	36-03-07
2002685	길 안	Giran	낙동강	길안천	128-54-39	36-25-54
2012645	도 천	Docheon	낙동강	낙동강	128-53-20	36-50-46
2006675	동 문	Dongmoon	낙동강	병성천	128-11-16	36-25-13
2021675	밀양1	Millyang 1	낙동강	밀양강	128-46-44	35-29-40
2008632	비 안	BiAn	낙동강	위 천	128-29-18	36-20-06
2004695	산 양	Sannyang	낙동강	금 천	128-15-39	36-36-41
2010690	선 산	Seonsan	낙동강	감 천	128-18-32	36-13-40
2022655	소 토	Soto	낙동강	양산천	129-02-49	35-22-50
2101675	안 강	Angang	형산강	형산강	129-15-55	35-58-52
2008690	용 곡	Yonggok	낙동강	위 천	128-23-53	36-21-29
2004655	월 포	Wolpo	낙동강	내성천	128-29-16	36-37-10
2001610	장 성	JangSeong	낙동강	황지천	129-01-02	37-05-45
2005660	점 촌	Jeomchon	낙동강	영 강	128-13-00	36-35-22
2019655	정 암	Jeongam	낙동강	남 강	128-17-43	35-18-48
2201630	조 동	Jodong	태화강	태화강	129-12-16	35-34-20
2004640	조 제	Joje	낙동강	내성천	128-35-59	36-42-59
2016680	죽 고	Jukgo	낙동강	황 강	128-17-34	35-34-19
2004680	향 석	Hyangseok	낙동강	내성천	128-19-10	36-35-10

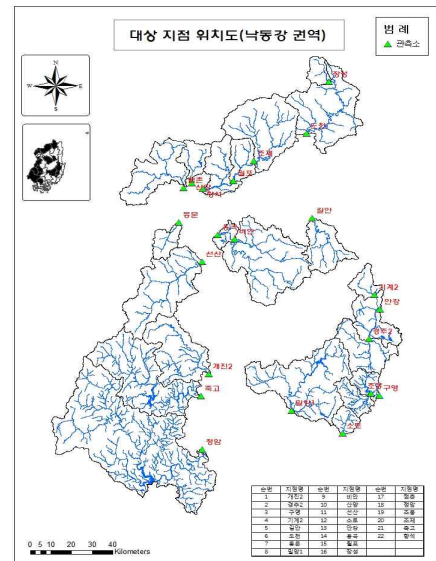


그림 1. 대상 지점 위치도

3.2 유역인자 산정 및 자료수집

미리 구축된 30m 수치표고자료(DEM)를 활용하여 래스터(raster) 및 벡터(vector)를 이용하는 ArcGIS로 공간분석을 수행하여 대상 유역의 특성인자를 산정하였다. 산정된 인자들은 유역의 특성을 나타내는 유역면적, 유역둘레, 유역평균경사, 유역평균표고와 유역 전반에 대하여 유출에 영향을 미치는 유역평균폭, 형상인자, 형상계수, 단일형상계수, 원형비, 세장률, 기복비, 상대기복, 기복수 등의 유역형상인자, 유로연장, 하상경사, 수계밀도, 하상계수, 최원유로연장, 수계유지상수, 섬세비, 유황계수 등의 하천특성인자를 산정하였다. 또한 유역내의 침투량과 손실량을 추정하고 유출량 등에 전반적인 경향 판단을 위해 국립농업과학원에서 제공하는 정밀토양도, 환경부에서 제공하는 대분류 토지피복지도의 공간 분석을 통하여 유출곡선지수(Curve Number, CN) 및 수문학적 토양군, 유사한 유역의 습윤 상태를 가리키는 지표로서 경사에 따라 물이 흐르는 방향에 직각을 만나는 단위 면적에 대한 물의 면적의 비율로 산출되는 지형습윤지수(Topographic Wetness Index or Compound Topographic Index, TWI)를 산정하였다.

3.3 평균 갈수량 및 기저유량비의 상관분석

미계측 유역의 평균 갈수량을 산정하기 위하여 유역 및 수문학적 특성을 설명할 수 있는 다수의 인

자 간의 상관분석을 수행하였고, 표 2와 같이 보통 이상의 상관관계를 갖는 유역인자들 중에서 기저유량비가 높은 상관관계를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 미세측 유역에서는 유량자료를 통하여 기저유량비를 산정할 수 없기 때문에 별도의 지역회귀모형의 개발이 필요하였고, 평균 갈수량과 보통 이상의 상관관계를 갖는 유역인자를 제외한 나머지 유역인자들과 기저유량비 간의 상관분석을 통해 표 3과 같이 선정하였다. 지하수위는 약한 상관관계를 나타냈으나 Yinqin Zhang(2013)은 지하수 및 습지에서 발생하는 유출이 하천에 기여할 잠재적인 영향을 준다고 하였고, 본 연구에서도 지표화 되어 고정된 다른 인자들과 달리 연도별 추정치에 변동성을 주기 위한 조절변수로 사용하기 위해 적용하였다.

표 2. 평균 갈수량-유역인자 상관계수(r)

상관관계	상관계수	상관관계	상관계수
유역면적	0.78	6년 평균 갈수량	0.51
유역둘레	0.78	TWI	-0.53
유역평균폭	0.78	5<TWI	0.63
원형비	0.58	HySEP-Fixed	0.66
기복수	0.62	HySEP-LocMin	0.70
최원유로연장	0.51	HySEP-Slide	0.70
유로연장	0.51	BFI Standard	0.80
하천의총길이	0.87	BFI Modified	0.78

표 3. 기저유량비-유역인자 상관계수(r)

상관관계		PART	HySEP-Fixed	HySEP-LocMin	HySEP-Slide	BFI Standard	BFI Modified
토양군	A	0.52	0.49	0.49	0.51	0.46	0.46
	C	-0.56	-0.47	-0.51	-0.51	-0.47	-0.48
TWI	min	-0.60	-0.56	-0.55	-0.58	-0.55	-0.55
	avg	0.48	0.37	0.44	0.40	0.38	0.40
	5<TWI	0.59	0.48	0.53	0.51	0.50	0.51
	15<TWI	0.48	0.36	0.45	0.39	0.39	0.41
지하수위(WTD)		-0.12	-0.12	-0.19	-0.16	-0.23	-0.22

상관분석을 통하여 선정된 유역인자는 종속변수인 평균 갈수량과 기저유량비와 상관관계가 낮거나 그 차이가 크지 않는 경우 해석하기 용이한 유역인자를 적용하기 위해 그림 2, 3과 같이 산점도 분석을 수행하였고, 유역인자 간의 상관분석을 통하여 서로 상관관계가 있는 인자들은 제외하였다.

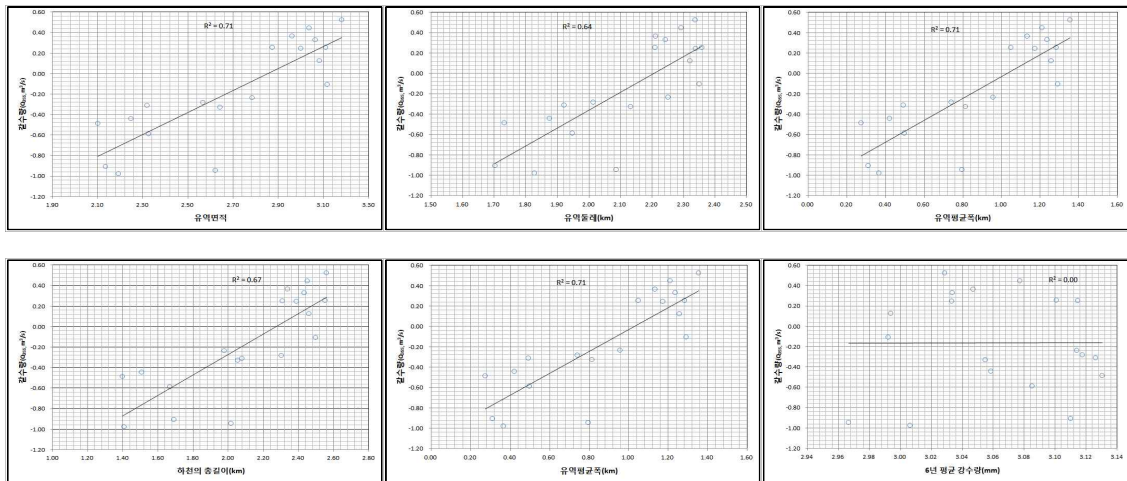


그림 2. 갈수량-유역인자 산점도

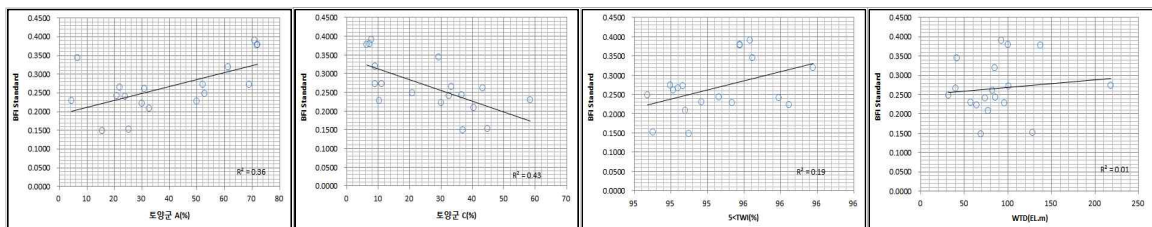


그림 3. 기저유량비-유역인자 산점도

강수량의 경우, 산점도에서 평균 강수량과 비상관 관계를 보이고 있으나 이태희(2016)와 Yinqin Zhang(2013)과 같이 유역특성을 해석하는데 필요하다고 판단하여 지역회귀모형 개발에 활용하였다.

4. 기저유량비를 이용한 평균 강수량 산정 및 평가

지역회귀모형 개발에 적용할 유역인자들은 다중공선성 여부를 확인하기 위해 분산팽창지수를 산정하였으며, 각각의 인자들은 분산팽창지수가 1.00~1.25의 범위에 분포하여 다중공선성은 없는 것으로 판단하여 미계측유역의 평균 강수량 및 기저유량비를 산정하기 위한 지역회귀모형을 다음 식 (1), (2)와 같이 개발하였다.

$$FI_{red} = 0.3727 - 0.0003x_1 - 0.0032x_2 \quad (1)$$

$$Q_{pred.} = 0.0001X_1^{0.744} X_2^{1.13911} X_3^{0.852} \quad (2)$$

식 (1)에서 x_1 은 지하수위(WTD, EL. m), x_2 는 토양군 C(%)이며, 식 (2)에서 X_1 은 평균 강수량(mm), X_2 는 BFI-Standard, X_3 은 유역면적(km^2)이다.

개발된 지역회귀모형은 실측자료에 대하여 상대오차(RE) 및 , 절대오차(AE), R_{adjust}^2 를 다음 표 4, 5와 같이 산정하였고, 그림 4, 5와 같이 실측자료와 비교하였다.

표 4. 지역회귀모형 평가(기저유량비)

지점명	SR	SSE	SST	RE	AE
개진2	0.0009	0.0023	0.0004	19.4%	19.4%
경주2	0.0004	0.0000	0.0007	2.4%	2.4%
구영	0.0011	0.0072	0.0140	57.2%	57.2%
기계2	0.0097	0.0037	0.0014	-26.5%	26.5%
길안	0.0058	0.0015	0.0132	25.7%	25.7%
도천	0.0000	0.0000	0.0000	-0.5%	0.5%
동문	0.0026	0.0000	0.0027	-0.1%	0.1%
밀양1	0.0000	0.0061	0.0060	-22.6%	22.6%
비안	0.0033	0.0027	0.0000	-19.9%	19.9%
산양	0.0022	0.0017	0.0000	15.2%	15.2%
소토	0.0001	0.0012	0.0019	15.5%	15.5%
안강	0.0002	0.0002	0.0000	-4.6%	4.6%
용곡	0.0022	0.0001	0.0034	5.7%	5.7%
월포	0.0028	0.0036	0.0126	-15.7%	15.7%
점촌	0.0019	0.0069	0.0016	36.6%	36.6%
조동	0.0013	0.0002	0.0006	-5.4%	5.4%
조제	0.0019	0.0044	0.0121	-17.5%	17.5%
항석	0.0028	0.0051	0.0155	-18.3%	18.3%
합계	0.0391	0.0469	0.0861	-	17.2%
	0.4546	R_{adjust}^2	0.3819		

표 5. 지역회귀모형 평가(평균 강수량)

지점명	SSR	SSE	SST	RE	AE
장성	0.5971	0.0007	0.6393	8.3%	8.3%
소토	0.7711	0.0152	1.0025	99.8%	99.8%
기계2	0.7851	0.0178	1.0395	127.2%	127.2%
동문	0.4934	0.0039	0.5846	17.3%	17.3%
조동	0.5246	0.0075	0.4069	-17.7%	17.7%
산양	0.4827	0.0294	0.7504	66.4%	66.4%
구영	0.5736	0.0233	0.3655	-29.4%	29.4%
길안	0.6435	0.0437	1.0226	184.4%	184.4%
경주2	0.2153	0.0370	0.4306	41.1%	41.1%
점촌	0.0483	0.1055	0.2965	56.0%	56.0%
개진2	0.0048	0.3496	0.4362	-33.1%	33.1%
조제	0.8193	0.0795	1.4092	-12.2%	12.2%
안강	0.0975	0.1033	0.4017	-18.3%	18.3%
도천	0.3507	1.1482	2.7681	-38.4%	38.4%
월포	1.7379	0.0942	1.0230	14.4%	14.4%
비안	0.1840	0.0492	0.0429	16.7%	16.7%
밀양1	2.4385	0.7888	0.4535	49.4%	49.4%
용곡	0.0239	0.2476	0.1176	63.7%	63.7%
항석	4.1119	0.0337	4.8905	-5.5%	5.5%
합계	14.9029	3.1781	18.0810	-	47.3%
R^2	0.8242	R_{adjust}^2	0.7891		

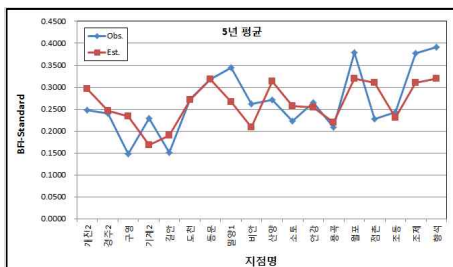


그림 4. 지역회귀모형 적용(기저유량비)

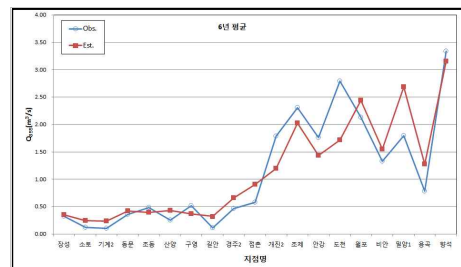


그림 5. 지역회귀모형 적용(평균 강수량)

개발한 기저유량비 지역회귀모형의 상대오차는 -26.5%(기계2)~57.2%(구영)의 범위로 분포하였고, 절대오차의 평균은 17.2%로 산정되었다. 평균 강수량 지역회귀모형은 상대오차가 -38.4%(도천)~184.4%(길안)의 범위에서 분포하고 있으며, 절대오차의 평균은 47.3%이다. 그러나 소토, 기계2, 길안 지점은

제외하면 절대오차는 30.6%이다.

평균 갈수량 산정의 검토와 관련하여 기존에 개발된 지역회귀모형을 적용하여 다음 그림 6과 같이 비교·분석을 하였다.

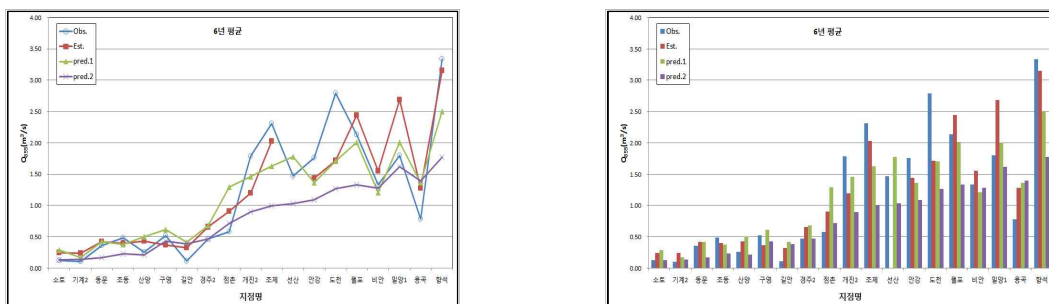


그림 6. 평균 갈수량 산정 비교

적용된 기간이 짧아 통계적으로 산정한 결과는 지역적 편차가 다소 발생하지만 실측자료와 비교적 유사한 경향을 나타내고 있고, 이에 따라 개발에 적용된 유역 인자는 유역특성을 설명하는 인자로서 의미를 가지는 것으로 판단된다.

5. 결론

실무적으로 종속변수로 고려하는 수위 또는 유량 등과 같은 수문변수 또는 인자와 유역 및 수문인자들 간의 상관분석을 통한 회귀모형은 비교적 용이하고 합리적으로 수위, 유량 등을 추정할 수 있는 이점을 가질 수 있다. 개발한 기저유량비 지역회귀모형으로 산정한 값을 평균 갈수량 지역회귀모형에 적용하여 산정한 결과는 기존에 개발한 지역회귀모형 보다 비교적 양호한 결과를 나타냈지만, 기존에 개발된 식이 다년간 통계자료를 토대로 개발한 반면에 짧은 기간의 자료를 적용한 결과로 절대적인 비교를 하는 것은 다소 부적절하다고 판단된다. 그러나 비록 수집된 자료가 6년으로 통계적인 가치가 떨어질 수는 있지만, 지역회귀모형 개발에 적용된 인자들 중에서 본 연구에서 적용한 기저유량비는 유역의 특성을 설명하는데 우수한 것으로 판단된다.

한편, 지역회귀모형 개발 시에 유역면적과 갈수량의 규모에 따라 분류를 하는 것이 정도 높은 지역회귀모형을 개발할 수 있을 것으로 판단되지만, 안정적이고 연속된 자료가 제공되는 지점의 수가 많지 않아 그 분류가 어려운 실정이다. 이에 따라 향후 충분한 유출량 자료를 가지고 있는 지점들을 선별하여 지역회귀모형을 개발한다면 좀 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 실무적으로 특정 연도 간의 자료를 적용하여 연 갈수량에 대한 회귀모형을 개발하는 것도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 이태희(2016), 미계측 유역의 유황곡선 산정을 위한 지역회귀모형의 개발, 박사학위논문, 아주대학교 대학원 건설교통학과
2. 조탁근(2007), 국내 미계측유역의 갈수량 산정 개선, 석사학위논문, 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부
3. 한국수자원학회(2009), 하천설계기준·해설, 국토해양부
4. Zhang, Y., Ahiablame, L., Engel, B. and Liu, Z.(2013), Regression Modeling of Baseflow and Baseflow Index for Michigan USA, Water-Open Access Journal, Vol.5, pp.1797-1815