

국내 미계측유역의 갈수량 산정 개선

Improving Low Flow Estimation for Ungauged Basins in Korea

조탁근* / 김영오** / 이길성***

Cho, Tak Guen / Kim, Young-Oh / Lee, Kil Seong

Abstract

Low flow is a minimum flow discharging during a dry season in a unregulated stream which can be shared by nature and human being. It is also a standard flow that determines a diversion requirement by evaluating water supply ability of streamflow in the aspect of water use. Low flow indices are used as average low flow and 1-day 10-year low flow in Korea and Japan and as 7-day 10-year low flow in the United States of America and the United Kingdom. In this research, these three indices were compared by the data observed and generated. Although daily records are needed to calculate the low flow, gauging stations are limited and records of the dry season are insufficient in Korea. Drainage-area ratio method is mainly used in Korea to estimate the low flow. This research shows the guideline when the drainage-area ratio method, the regional regression method, and the baseflow correlation method to calculate the low flow of ungauged basins are applied and recommends low flow estimation method suitable to Korea.

keywords : average low flow, 1-day 10-year low flow, 7-day 10-year low flow, ungauged basin, drainage-area ratio method, regional regression method, baseflow correlation method

요 지

갈수량(low flow)은 과거 자연상태 하천에서 갈수기에 흘렀던 유량으로서 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량이며, 이수측면에서 하천수의 공급능력을 평가하여 취수량을 설정하는 기준 유량이다. 일본과 우리나라에서는 평균갈수량과 기준갈수량을, 미국과 영국 등에서는 10년빈도 7일 갈수량(7Q₁₀)을 갈수량 지표로 사용하고 있다. 본 연구에서는 위의 세 지표를 관측자료와 모의 생성자료를 이용하여 비교하고 고찰하여 보았다. 갈수량 산정을 위해서는 과거의 관측 유량자료가 필요하나 국내에는 수위관측시설이 한정되어 있을 뿐 아니라 홍수기에 비해 갈수기 자료가 턱없이 부족하여 갈수량 산정에 많은 어려움을 겪고 있다. 국내에서는 대부분 비유량법(drainage-area ratio method)으로 미계측유역의 갈수량을 산정하고 있다. 본 연구에서는 미계측유역(ungauged basin)의 갈수량을 산정하기 위한 방법으로 비유량법과 지역회귀기법(regional regression method), 기저유량상관법(baseflow correlation method)을 국내에 적용하여 보고, 각 방법의 적용시 지침과 국내에 적합한 갈수량 산정방

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정

Master Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: snutak1@snu.ac.kr)

** 교신저자, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

법을 제시하였다.

핵심용어 : 평균갈수량, 기준갈수량, 10년빈도 7일 갈수량, 미계측유역, 비유량법, 지역회귀기법, 기저유량상관법

1. 서론

최근 들어 관심이 높아지고 있는 유역통합관리(integrated watershed management)는 주체의 측면에서 치수, 이수, 수질을 종합적으로 고려하게 되는데, 이수 측면에서 하천수의 공급능력을 평가하여 취수량을 설정하는 기준유량으로 사용되는 것이 갈수량(low flow)이다(한국수자원공사, 1995). 따라서 갈수량의 크기와 빈도를 파악하는 것은 물공급 계획 및 관리, 저수지 설계, 관개용수의 수량과 수질 관리, 레크리에이션, 생태계 보존 등에 있어서 매우 중요한 과정이다.

각 나라마다 사용되는 갈수량 지표(low flow index)는 지속기간과 재현기간에 있어 다양한데, 예를 들어 우리나라와 일본에서는 평균갈수량(average low flow)과 기준갈수량(1-day, 10-year low flow)을 주로 사용하며, 미국에서는 10년빈도 7일 갈수량(7-day, 10-year low flow)을 사용하고 있다. 그러나 다양한 갈수량 지표들의 공학적 비교분석을 통한 연구는 미비하며, 우리나라의 경우 왜 평균갈수량을 사용하고 있는지 이론적 타당성을 찾기 어렵다. 여기에 본 연구의 첫 번째 목적이 있다. 즉, 다양한 갈수량 지표들 중 우리나라에서 사용되는 평균갈수량과 기준갈수량, 미국에서 주로 사용되는 10년빈도 7일 갈수량을 관측자료와 모의 생성자료를 통하여 비교해 보고, 우리나라에서 사용되는 평균갈수량이 상대적으로 어떤 특징을 갖고 있는지를 살펴보고자 한다.

갈수량 산정을 위해서는 장기간의 과거 관측 일유량 자료가 필요하지만, 국내에는 수위 관측시설이 한정되어 있을 뿐 아니라, 갈수기의 수위-유량관계곡선을 보유한 수위관측소가 충분치 못해 홍수기에 비해 갈수기 자료가 턱없이 부족한 실정이다. 따라서 일유량 자료의 기간이 짧거나 전무한 미계측유역(ungauged basin)은 장기간의 관측 일유량 자료를 보유한 계측유역(gauged basin)의 자료를 이용하여 갈수량을 추정하여야 한다. 기존의 국내 미계측유역 갈수량 산정방법으로는 비유량법(drainage-area ratio method)이 주로 사용되어 왔으나 좀 더 정확한 갈수량 추정을 위해서는 다양한 유역 특성인자들의 고려가 필요하다.

비유량법(drainage-area ratio method)은 국내 실무에서 가장 많이 사용되는 미계측유역의 갈수량 산정방

법이다. 미국 Massachusetts 주에서는 유역면적비가 0.3에서 1.5 사이일 때 이 방법을 사용할 것을 권장하였다(Ries and Friesz, 2000). 국내에서는 계측유역으로 한강권역에서는 여주수위표(건설교통부, 2002b; 서울특별시, 2002), 낙동강권역에서는 왜관수위표(건설교통부, 1997), 그리고 금강권역에서는 규암과 공주수위표 지점(건설교통부, 2002a)이 주로 사용되고 있다. 지역회귀기법(regional regression method, RRM)은 세계적으로 많이 사용되는 방법(Smakhtin, 2001)이나 홍수량에 비해 갈수량에서는 제한적인 성공을 거두었다(Vogel and Kroll, 1992). Thomas and Benson(1970)은 포토맥강 유역에서 홍수량 지역회귀모형과 갈수량 지역회귀모형을 모두 적용하였는데, 갈수량 지역회귀모형의 평균예측오차가 홍수량 지역회귀모형의 평균예측오차보다 2배 이상 큰 것으로 나타났다. Fennessey and Vogel(1990)과 Vogel and Kroll(1990)은 미 New England 주의 갈수량을 산정하기 위해 지역회귀모형을 개발하였다. Arihood and Glatfelter(1991)는 미 Indiana 주, Flynn(2003)은 미 New Hampshire 주의 유황과 갈수량 통계특성을 추정하는 회귀식을 개발하였다. 국내에서는 안상진 등(1981)이 유역면적, 유역고도, 1차 하천연장과 10년빈도 7일 갈수량의 관계를 분석하여 금강유역 미계측유역의 빈도별 갈수량을 추정할 수 있는 갈수량 빈도곡선을 작성하였다. 이명섭(1993)은 유역면적, 기저유출지수(baseflow index), 연평균 강수량 등의 인자들을 이용하여 갈수량을 추정하는 모형을 제안한 바 있다. 이재형과 조기태(1999)는 유역면적, 평균유역경사, 기저유량 감수계수를 이용하여 미계측 산지하천 유역의 평균갈수량과 기준갈수량을 산정하는 회귀식을 제시하였다. Stedinger and Thomas(1985)는 지역회귀기법의 대안으로 기저유량상관법(baseflow correlation method)을 제안하였고 Wilson(2000)은 미 Indiana 주의 하천들을 대상으로 기저유량상관법을 적용하여 10년빈도 7일 갈수량과 2년빈도 7일 갈수량을 추정하였다.

따라서 본 연구의 후반부에서는 기존의 미계측유역 갈수량 산정방법인 비유량법을 검토해보고, 이를 개선하기 위하여 지역회귀기법과 기저유량상관법을 국내에 적용시켜 보고자 한다. 이를 통해 각 방법의 적용시 지침과 국내 갈수량 산정의 개선방향을 제시하고자 한다.

2. 갈수량 지표의 비교

우리나라에서 주로 사용되는 평균갈수량은 매 년의 355일 이상 유지되는 유량(355일 유지유량, 355Q)을 산술평균한 값이고, 기준갈수량은 355일 유지유량 중 재현기간 10년에 해당하는 값이다(한국수자원공사, 1995). 미국에서 주로 사용되는 10년빈도 7일 갈수량(7Q₁₀)은 연중 지속기간 7일 유량의 최소치의 일평균(최저 7일 평균유량, 7Q) 중 재현기간 10년에 해당하는 값이다(Smakhtin, 2001). 본 연구에서는 빈도개념을 제외한 355일 유지유량과 최저 7일 평균유량을 관측자료와 모의 생성자료를 이용하여 비교하고, 다음으로 관측자료만을 이용하여 평균갈수량, 기준갈수량 그리고 10년빈도 7일 갈수량을 비교하였다. 일유량 자료의 모의 생성 시 기본적인 시계열 모형인 AR(1) 모형을 사용하였으며, 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. 모의 일유량 자료는 임의의 통계량 또는 관측자료에 의한 통계량을 이용하여 100년치를 생성하였다.

2.1. 355일 유지유량과 최저 7일 평균유량의 비교

2.1.2 관측자료의 통계량에 따른 비교

국내 7개 댐유역(충주댐, 소양강댐, 괴산댐, 대청댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐)과 미국의 1개 유역(Whitewater River)의 통계량을 이용하여 일유량 자료를 모의 생성한 후, 355일 유지유량과 최저 7일 평균유량의 크기를 비교해 보았다. 각 유역에 존재하는 과거 일유량 자료의 일 통계특성, 즉 평균, 분산, lag-1 자기상관계수를 355일 계산한 후 주기성을 표현하는데 효과적인

Fourier series로 적합(fitting)하였다. Table 1의 비교결과를 보면, lag-1 자기상관계수가 각각 0.9와 0.91인 Whitewater River와 괴산댐은 관측자료와 모의 생성자료 모두 355일 유지유량이 큰 경우가 최저 7일 평균유량이 큰 경우보다 2배 이상 많은 것을 확인할 수 있다. 여기서 관측자료란 관측된 일유량 자료를 그대로 이용하여 갈수량 지표를 구해본 결과이다. 이는 갈수량 지표의 빈도가 같을 경우, 355일 유지유량을 사용한 갈수량이 최저 7일 평균유량을 사용한 갈수량보다 크다는 것을 의미한다. 다음으로, lag-1 자기상관계수가 각각 0.85, 0.82, 0.79를 나타내는 대청댐, 충주댐, 합천댐을 보면 모의 생성자료에 의한 결과는 355일 유지유량이 큰 경우와 최저 7일 평균유량이 큰 경우가 비슷하게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 관측자료에 의한 결과는 다른 양상을 보이는데, 대청댐은 355일 유지유량이 큰 경우가 최저 7일 평균유량이 큰 경우의 절반이고, 이와 반대로 충주댐과 합천댐은 355일 유지유량이 큰 경우가 최저 7일 평균유량이 큰 경우보다 약 2 ~ 3배 정도 많다. 이와 같이 관측자료와 모의 생성자료의 결과가 다르게 나타나는 원인은 관측자료의 표본수가 적어서 생기는 표본오차에 의한 불확실성이 크기 때문이다. 마지막으로 lag-1 자기상관계수가 가장 낮은 0.74 ~ 0.76인 소양강댐, 안동댐, 임하댐은 355일 유지유량보다 최저 7일 평균유량이 큰 경우가 더 많은 것을 확인할 수 있다. 이 경우에는 괴산댐이나 Whitewater River와 반대로, 동일한 빈도를 갖는 갈수량의 경우 최저 7일 평균유량을 사용한 갈수량이 355일 유지유량을 사용한 갈수량보다 크다는 것을 의미한다.

Table 1. Comparison of 355Q vs. 7Q Using Observed and Generated Data

Basins	Average of statistics of logarithmic daily flow			Results of comparison*	
	Average	Standard deviation	Lag-1 autocorrel. coef.	Observed data (Percentile)	Generated data
Andong Dam	3.04	0.65	0.74	1 : 27 (4 : 96)	29 : 71
Soyanggang Dam	3.05	1.11	0.76	6 : 25 (19 : 81)	32 : 68
Imha Dam	1.70	1.33	0.76	2 : 10 (17 : 83)	29 : 71
Hapcheon Dam	2.02	1.11	0.79	10 : 6 (63 : 37)	57 : 43
Chungju Dam	4.13	0.90	0.82	15 : 4 (79 : 21)	43 : 57
Daecheong Dam	3.45	1.03	0.85	8 : 16 (33 : 67)	53 : 47
Goesan Dam	1.54	0.99	0.91	16 : 7 (70 : 30)	78 : 22
Whitewater River	1.42	1.15	0.90	31 : 2 (94 : 6)	86 : 14

* Number of Years that 355Q > 7Q : Number of Years that 355Q < 7Q

2.1.2 모의 유량에 따른 비교

355일 유지유량이 최저 7일 평균유량보다 큰 해의 수가 대수 변환된 일유량의 표준편차와 lag-1 자기상관계수의 변화에 따라 어떻게 변하는지를 모의 생성자료를 이용하여 살펴보았다. 일유량 자료의 생성시 평균은 일반적으로 우리나라에서 발생하는 유량패턴으로 고정하였다. 반면 표준편차는 0.1, 0.5, 2, 5로 일정하게 한 경우와 평균과 동일한 패턴을 가지고 변동계수를 0.5, 1, 1.5로 일정하게 한 경우, 그리고 표준편차가 평균과 반대의 패턴을 갖는 case 1(계절별 변화폭이 작음) 및 case 2(계절별 변화폭이 큼) 등 8가지 경우로 변화시켰다. 또한 lag-1 자기상관계수는 일정하게 0.3, 0.6, 0.9를 적용한 경우와 계절적 변화를 고려하여 갈수기~홍수기~갈수기의 상관계수를 0.9~0.3~0.9 및 0.3~0.9~0.3으로 변화시킨 경우로 나누었다.

Table 2는 표준편차와 lag-1 자기상관계수에 따른 100년 모의자료 중 355일 유지유량이 최저 7일 평균유량보다 큰 해의 수이다. Table 2를 살펴보면, 표준편차가 작아지고 lag-1 자기상관계수가 커질수록 355일 유지유량이 최저 7일 평균유량보다 큰 해의 수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 대수를 취한 일유량의 표준편차가 0.1이고 lag-1 자기상관계수가 0.9인 경우, 100년 중 99년이 355일 유지유량이 큰 것으로 나타났다. Lag-1 자기상관계수의 계절적 변화를 고려한 경우, 갈수기인 겨울철의 lag-1 자기상관계수의 값에 따라 355일 유지유량이 큰 해의 수가 결정된다. 갈수기의 lag-1 자기상관계수가 큰 0.9~0.3~0.9가 0.3~0.9~0.3보다 355일 유지유량이 큰 해의 수가 많다. 변동계수를 일정하게 적용한 경우에도 변동계수가 작을수록 355일 유지유량이 최저 7일 평균유량보다 큰 해의 수가 증가한다. 따라서 일유량 자료는 표준편차가 작을수록, lag-1 자

기상관계수가 클수록, 즉 지속성이 유지될수록 355일 유지유량이 최저 7일 평균유량보다 큰 해의 수가 증가하고, 이는 빈도가 같을 경우 355일 유지유량에 의한 우리나라의 갈수량 지표가 최저 7일 평균유량에 의한 미국의 갈수량 지표보다 클 것이라는 것을 예상하게 해준다.

2.2 평균갈수량과 기준갈수량, 10년빈도 7일 갈수량의 비교

관측자료를 그대로 이용하여 빈도개념을 포함한 평균갈수량($1Q_{avg}$)과 기준갈수량($1Q_{10}$), 10년빈도 7일 갈수량($7Q_{10}$)을 비교하였다. 앞선 분석과 달리 평균갈수량은 355일 유지유량을 산술평균하므로 0 자료의 처리가 불필요하나, 기준갈수량과 10년빈도 7일 갈수량은 0 자료를 처리해야 한다. 즉, 빈도분석시 대수정규분포 또는 Weibull 분포에 대해 적합할 수 없으므로 0 자료의 처리가 필요하다. 본 연구에서 0 자료의 처리는 먼저 0을 뺀 자료들만으로 적정 확률분포 $G(x)$ 를 선정하고, Eq (1)에 의해 해당하는 재현기간의 값 x 를 산정하게 된다 (Stedinger et al., 1992).

$$F(x) = p_0 + (1 - p_0)G(x) \quad (1)$$

여기서, p_0 는 자료 전체의 수 중 0 자료의 비율, $F(x)$ 는 전체 자료의 누가분포함수, $G(x)$ 는 0을 뺀 자료의 누가분포함수이다. 기준갈수량과 10년빈도 7일 갈수량의 경우 $F(x)=0.9$ 이다.

10년빈도 7일 갈수량을 산정하기 위해 먼저 0 자료를 제외한 355일 유지유량과 최저 7일 평균유량의 적정 확률분포형을 검토하였다. 본 연구에서는 김경덕 등 (2003)이 국내에 적용한 바 있는 2변수 gamma, 2변수

Table 2. Number of Years that 355Q > 7Q Among 100 Synthetic Flow Series

Lag-1 autocorrel. coef.		Stdev				
		0.3	0.6	0.9	0.9~0.3~0.9	0.3~0.9~0.3
Stdev = constant	0.1	57	84	99	96	60
	0.5	7	35	86	72	6
	2	0	9	56	25	2
	5	0	1	36	10	4
Cv = constant	0.5	0	4	60	9	11
	1	0	2	44	4	13
	1.5	0	2	39	2	12
Case 1		0	11	76	49	1
Case 2		0	4	40	21	1

log-normal, 2변수 Weibull분포에 대해 카이제곱검정을 실시한 결과, 2변수 Weibull분포가 다수를 차지하여 355일 유지유량과 최저 7일 평균유량의 적정 확률분포 형으로 선정하였다.

355일 유지유량과 최저 7일 평균유량의 빈도분석을 위해 Blom의 plotting position 공식(Eq. (2))을 적용하였다.

$$q_i = \frac{i - 3/8}{n + 1/4} \quad (2)$$

여기서, n 은 자료 전체의 수, i 는 내림차순정렬시의 순위이다.

Table 3은 관측자료를 이용하여 평균갈수량과 기준 갈수량, 10년빈도 7일 갈수량을 산정한 결과이다. 평균 갈수량과 10년빈도 7일 갈수량을 비교하면, 모든 유역에서 평균갈수량이 큰 값을 가진다. 그러나 빈도가 같은 기준갈수량과 10년빈도 7일 갈수량을 비교하면, 관측자료에서 355일 유지유량이 큰 해의 수가 최저 7일 평균유량이 큰 해의 수보다 많은 합천댐, 충주댐, 괴산댐에서 기준갈수량이 10년빈도 7일 갈수량보다 큰 것으로 나타났다. 우리나라에서 주로 사용하는 갈수량 지표인 평균갈수량이 미국에서 주로 사용되는 10년빈도 7일 갈수량보다 크다는 것은 우리나라가 갈수기 자연하천의 유량을 미국보다 더 크게 요구하고 있으며, 이수관리에 있어서 상대적으로 보수적인 경향을 가지고 있음을 보여준다.

Table 3. Estimation 1Q_{avg}, 1Q₁₀, and 7Q₁₀ Using Observed Data (unit: cms)

Basins	1Q _{avg}	1Q ₁₀	7Q ₁₀
Andong Dam	1.80	0.45	1.10
Soyanggang Dam	2.05	0.28	0.55
Imha Dam	0.56	0.15	0.21
Hapcheon Dam	1.46	0.43	0.23
Chungju Dam	13.18	7.00	6.30
Daecheong Dam	6.45	1.09	1.80
Goesan Dam	1.13	0.40	0.28
Whitewater River	0.80	0.18	0.20

3. 미계측유역의 갈수량 산정

3.1 기본이론

3.1.1 비유량법(drainage-area ratio method)

비유량법은 미계측유역의 단위면적당 유량이 수문학

적으로 유사한 계측유역과 같을 것이라는 가정 하에 유역면적비에 따라 미계측유역의 갈수량을 추정하는 방법이다. 이 방법은 계측유역과 미계측유역의 근접성, 유역 특성의 동질성에 기인하므로 계측유역의 관측소와 미계측유역이 동일한 하천에 위치할 때 결과의 정확도가 높다(Ries and Friesz, 2000).

$$Q_y = Q_x (A_y/A_x)^m \quad (3)$$

여기서, Q_y 는 미계측유역의 평균갈수량, Q_x 는 계측유역의 평균갈수량, A_y 와 A_x 는 각각 미계측유역과 계측유역의 유역면적, m 은 한 쌍의 계측유역의 갈수량 분석을 통해 얻어지는 지수이다. 이 방법의 장점은 미계측유역의 유량자료가 전무한 상태에서 유역면적만을 가지고 갈수량을 추정할 수 있다는 것이다.

3.1.2 지역회귀기법(regional regression method)

지역회귀기법(regional regression method)은 세계적으로 가장 널리 사용되는 미계측유역의 갈수량 산정방법(Smakhtin, 2001)으로 가용한 지형, 지질, 기상, 수문학적 인자들을 이용하는 기법이다. 가장 일반적으로 사용되는 회귀식의 형태는 다음의 Eq. (4)와 같다.

$$Q = b_0 X_1^{b_1} X_2^{b_2} X_3^{b_3} \dots \quad (4)$$

여기서, Q 는 유역의 평균갈수량, X_i 는 유역특성인자, b_i 는 매개변수로 여러 계측유역의 평균갈수량과 유역 특성인자를 이용하여 추정된다. 계측유역은 상류에 댐 또는 이·취수와 같은 인위적인 조절이 없는 유역을 선택한다.

Vogel and Kroll(1992)은 기존의 다중회귀방법(Parker, 1977; Vogel and Kroll, 1990; Fennessey and Vogel, 1990)이 미계측유역의 갈수량 추정에 한계가 있음을 지적하고, 그 대안으로 간단한 Dupuit-Boussinesq stream-aquifer 모형을 이용하여 Eq. (5)와 같은 지역회귀식을 제안하였다.

$$Q = b_0 A^b S^{b_s} K_b^{b_k} \quad (5)$$

여기서, A 는 유역면적, S 는 유역평균경사, K_b 는 기저유량 감수상수이다.

3.1.3 기저유량상관법(baseflow correlation method)

Stedinger and Thomas(1985)가 개발한 기저유량상관법은 계측유역과 미계측유역 간 기저유량(baseflow)

의 상관관계를 통하여 미계측유역의 갈수량을 추정하는 방법으로, 계측유역이 많지 않은 경우의 일시적 대안이며, Reilly and Kroll(2003)은 다음과 같은 조건에서 적용할 것을 권장하였다.

- (i) 연속적으로 6일 이상 감소하는 유량에서 하나의 기저유량만 선택
- (ii) 미계측유역에서 최소 10개, 가급적 15개의 기저유량 관측
- (iii) 미계측유역으로부터 200 km 이내의 계측유역 선정
- (iv) 미계측유역의 기저유량과 상관계수가 0.7 이상인 계측유역 선정

이 방법의 기본가정은 미계측유역의 대수를 취한 연 최저유량 y_i 가 계측유역의 대수를 취한 연 최저유량 x_i 와 선형 관계라는 것이다.

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i \quad (6)$$

$$\epsilon_i \sim N(0, \sigma_\epsilon^2)$$

여기서, α, β 는 모형의 매개변수이고, ϵ_i 는 평균이 0, 분산이 σ_ϵ^2 인 오차항이다. 그러나 미계측유역의 연 최저유량을 알 수 없으므로, 위의 선형 관계를 미계측유역과 계측유역의 기저유량 \tilde{y}_i 와 \tilde{x}_i 에 적용시키면 다음과 같다.

$$\tilde{y}_i = \alpha + \beta \tilde{x}_i + \epsilon_i \quad (7)$$

$$\epsilon_i \sim N(0, \sigma_\epsilon^2)$$

미계측유역의 갈수량 추정값 Q 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\ln(Q) = \mu_y + K_y \sigma_y \quad (8)$$

여기서, μ_y 는 대수를 취한 평균의 추정값이고, σ_y 는 대수를 취한 표준편차의 추정값이다. K_y 는 미계측유역의 빈도계수(frequency factor)로써 계측유역의 빈도계수인 K_x 와 같다고 가정한다. 따라서 μ_y 와 σ_y 만 추정하면 된다. Stedinger and Thomas(1985)는 μ_y 와 σ_y 의 추정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\mu_y = a + b m_x \quad (9)$$

$$\sigma_y^2 = b^2 s_x^2 + s_\epsilon^2 \left(1 - \frac{s_x^2}{(L-1)s_x^2}\right) \quad (10)$$

여기서, m_x 와 s_x^2 은 계측유역의 대수를 취한 연 최저유량의 평균과 분산이고, s_ϵ^2 은 계측유역의 대수를 취한 일 기저유량의 표본분산이다. L 은 측정한 기저유량의 일자로 갯수이고, a, b, s_ϵ^2 은 각각 Eq. (7)의 $\alpha, \beta, \sigma_\epsilon^2$ 의 표본 추정값으로 최소제곱법에 의해 구해진다.

$$a = m_y - b m_x \quad (11)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^L (\tilde{y}_i - m_y)(\tilde{x}_i - m_x)}{s_x^2 (L-1)} \quad (12)$$

$$s_\epsilon^2 = \frac{1}{L-2} \sum_{i=1}^L (\tilde{y}_i - a - b \tilde{x}_i)^2 \quad (13)$$

여기서 m_y 와 m_x 는 각각 미계측유역의 대수를 취한 일 기저유량 관측치와 그에 대응하는 계측유역의 일 기저유량의 평균이다.

3.2 적용사례

3.2.1 대상유역

국가 수자원관리 종합시스템(www.wamis.go.kr)을 통해 장기간의 수위자료와 수위-유량관계식을 보유하고 있으며, 상류에 댐 또는 인위적인 유량 조절이 없는 진국의 댐 및 수위관측소 유역을 조사하여 대상유역을 선정하였다. 선정된 대상유역은 한강 권역 5개, 낙동강 권역 7개, 금강 권역 4개 유역으로 총 16개 댐 및 수위관측소 유역이다(Table 4). 수위자료는 해당 년도의 수위-유량관계식에 의해 유량자료로 변환하였으며, 수위-유량관계식이 없거나 갈수기 자료를 포함하지 않는 수위-유량관계식이 존재하는 년도의 경우는 제외하였다. 추정정확도의 평가에는 systematic error를 나타내는 Relative Bias(R-Bias)와 systematic error와 random error를 함께 나타내는 Relative Root Mean Square Error(R-RMSE)가 사용되었다.

3.2.2 비유량법(drainage-area ratio method)

1개 유역을 계측유역으로, 나머지 15개 유역을 미계측유역으로 하여 Eq. (3)에 의해 비유량법을 적용하는

Table 4. Basin Characteristics of Study Basins

Basins	Record period (year)	Average low flow (cms)	Basin area (km ²)	Mean slope(%)	Drainage density (km/km ²)	Baseflow recession constant
Emokjeong	16	0.60	55.82	39.78	1.08	0.912
Baekokpo	14	1.60	148.84	38.69	0.95	0.887
Youngyang	8	0.71	314.59	43.61	2.68	0.927
Cheongsong	7	0.85	308.03	41.39	3.22	0.915
Donggok	8	0.04	46.61	45.91	3.65	0.890
Goro	8	0.18	109.04	44.72	3.16	0.925
Epyung Brid.	19	0.90	76.38	29.92	1.93	0.919
Tanbu Brid.	16	0.65	79.83	36.95	1.12	0.934
Gidae Brid.	15	3.11	353.73	28.00	1.64	0.936
Chungju Dam	19	13.18	6661.58	34.89	1.76	0.910
Soyanggang Dam	31	2.05	2694.35	45.97	1.41	0.869
Goesan Dam	23	1.13	676.73	36.87	2.70	0.905
Daecheong Dam	24	6.45	4190.41	35.82	2.49	0.860
Andong Dam	28	1.80	1590.72	42.39	3.29	0.877
Imha Dam	12	0.56	1367.74	40.35	2.92	0.860
Hapcheon Dam	16	1.46	928.94	34.87	3.61	0.922

과정을 16개 대상유역에 대해 반복 수행하는 교차검증 (cross validation)을 실시하고 기존의 비유량법과 비교 하였다. 기존 방법의 계측유역으로는 한강권역에서 여 주수위표, 낙동강권역에서 왜관수위표, 금강권역에서 규 암수위표 지점이 사용되었으며, 지수 m 은 1로 설정하 였다.

(1) 계측유역에 따른 추정정확도

Fig. 1은 x축에 나타난 각 지점을 계측유역으로 사용 하였을 경우 나머지 15개 미계측유역의 오차 지표를 평 균한 그래프이다. Previous는 비유량법 적용시 기존에 사용되던 계측유역(여주수위표, 왜관수위표, 규암수위 표)을 이용하여 산정된 평균갈수량의 추정정확도이다. Fig. 1을 보면, 고로 유역을 계측유역으로 한 경우, R-Bias와 R-RMSE 모두 가장 좋은 추정정확도를 보이 지만 자료기간이 8년으로 짧아 신뢰도가 떨어진다. 비 교적 유량자료의 신뢰도가 높은 충주댐과 안동댐의 경 우, 자료기간도 각각 19년과 28년으로 길고, 기존 방법 보다 R-Bias와 R-RMSE가 향상되었다. 따라서 한강권 역과 금강권역은 충주댐, 낙동강권역은 안동댐을 계측 유역으로 사용할 경우 기존의 방법보다 미계측유역의 갈수량을 좀 더 정확하게 산정할 수 있을 것으로 사료 된다.

(2) 유역면적비에 따른 추정정확도

유역면적비의 구간을 0~0.3, 0.3~0.6, 0.6~0.9, 0.9~ 1.2, 1.2~1.5, 1.5 이상의 총 6개 구간으로 나누어 이에

해당하는 미계측유역의 평균갈수량 추정값과 관측값을 이용하여 R-Bias와 R-RMSE를 구하고 추정정확도를 평가하였다. Fig. 2에서 R-RMSE를 고려하였을 때, 유역면적비가 0.9~1.2인 경우의 추정정확도가 가장 양호 하다. 따라서 국내에서 비유량법에 의해 미계측유역의 평균갈수량을 산정시 계측유역에 대한 미계측유역의 유역면적비 (A_y/A_x)가 0.9~1.2인 경우, 보다 정확한 평균 갈수량을 산정할 수 있다. 유역면적비가 1.5 이상인 경 우는 추정정확도가 큰 폭으로 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이로부터 유역면적이 작은 계측유역을 이용하 여 유역면적이 큰 미계측유역의 평균갈수량을 추정하는 것은 위험하다는 것을 확인할 수 있다.

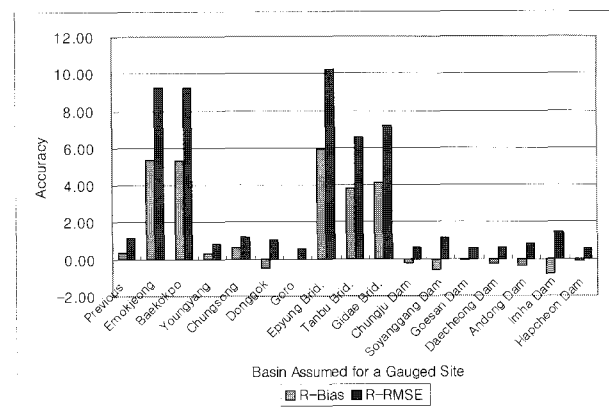


Fig. 1. Estimation Accuracy of the Drainage-Area Ratio Method for 15 Ungauged Basins Using 1 Gauged Basin shown in the X-axis

Table 5. Basin Characteristics of 7 Dam Basins

Basins	Basin area (km ²)	Mean slope (%)	Drainage density (km/km ²)	Average annual precipitation (mm)	Average annual precipitation except Jul. ~ Sep.(mm)	Curve Number	Temperature (°C)
Chungju Dam	6661.58	34.89	1.76	1197.6	546.9	76.46	8.2
Soyanggang Dam	2694.35	45.97	1.41	1100.0	498.3	77.52	9.9
Goesan Dam	676.73	36.87	2.70	1076.0	525.4	76.54	10.7
Daechong Dam	4190.41	35.82	2.49	1230.0	605.9	77.88	11.0
Andong Dam	1590.72	42.39	3.29	950.0	515.4	71.51	10.1
Imha Dam	1367.74	40.35	2.92	987.1	449.9	67.49	11.8
Hapcheon Dam	928.94	34.87	3.61	1249.1	585.1	76.44	11.5

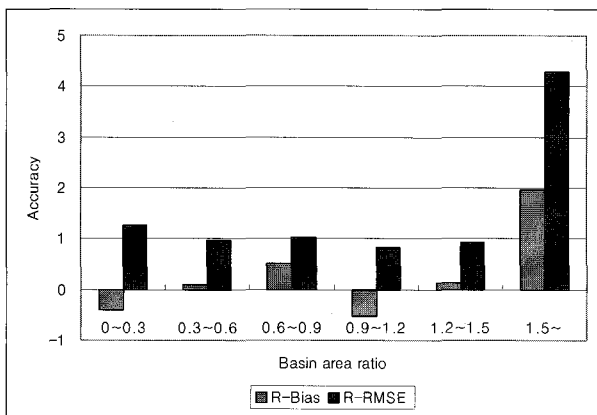


Fig. 2. Estimation Accuracy of the Drainage-Area Ratio Method According to Basin Area Ratio

3.2.3 지역회귀기법(regional regression method)

7개 유역의 유량자료를 이용하여 Table 5와 같이 유역면적, 유역평균경사, 하천밀도, 유역평균강수량, 건기 시 유역평균강수량, Curve Number, 평균기온, 그리고 Vogel and Kroll(1992)이 제안한 기저유량 감수상수 중 가장 좋은 추정정확도를 가지는 유역특성인자를 선택하기 위해 앞서의 교차검증(cross validation)을 수행하였다. 교차검증은 1개 유역을 미계측유역으로 하고 나머지 유역을 이용하여 회귀식을 구성한 후, 평균강수량을 산정하여 검증하는 절차를 7개 유역에 반복 수행하는 것이다.

Table 6을 보면 여러 가지 유역특성 중에서 유역면적과 유역평균경사를 이용한 회귀식과 유역면적, 유역평균경사, 하천밀도를 이용한 회귀식의 추정정확도가 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시하는 국내 미계측유역의 평균강수량 산정 회귀식은 다음의 Eq. (14)와 같다.

$$Q = 12831.25A^{0.67}S^{-3.46}D^{-1.07} \quad (14)$$

여기서, Q 는 평균강수량, A 는 유역면적(km²), S 는 유역평균경사(%), D 는 하천밀도(km/km²)이다. 이는 교차검증과는 달리 7개 댐유역의 자료를 모두 사용하여 구한 결과이다.

Table 6. Cross Validation of Regional Regression Method Using 7 Dam Basins

Model	R Bias	R RMSE	R ² (%)
A, S	-0.11	0.29	95.93
A, D	-0.16	0.84	47.51
A, P	-0.18	0.67	73.46
A, P_d	-0.03	0.97	34.95
A, CN	-0.16	0.79	54.57
A, T	-0.27	0.70	70.28
A, K_b	-0.22	0.81	79.43
A, S, D	0.16	0.62	96.38
A, S, P	-0.15	0.47	87.25
A, S, P_d	-0.09	1.10	20.16
A, S, CN	0.15	0.83	47.78
A, S, T	4.65	12.81	82.31
A, S, K_b	-0.13	0.73	81.27

A : basin area, S : mean slope, D : drainage density, P : average annual precipitation, P_d : average annual precipitation except Jul. ~ Sep., CN : curve number, T : temperature, K_b : baseflow recession constant

3.2.4 기저유량상관법(baseflow correlation method)

비유량법과 마찬가지로, 16개 대상유역 중 1개 유역을 계측유역으로 하고 나머지 15개 유역을 미계측유역

으로 하여 평균갈수량을 산정하고, 이를 16개 유역에 대하여 반복 수행하였다. 기저유량의 분리는 N-day법을 사용하였으며 미계측유역의 기저유량은 대부분의 경우 15개를 선택하였으며, 계측유역과 일치하는 기저유량 자료가 적은 곳은 최소 11개를 선택하였다.

(1) 계측유역에 따른 추정정확도

Fig. 3에서 계측유역으로 탄부교와 임하댐을 선택한 경우, R-Bias, R-RMSE가 각각 0.475, 1.224와 0.304, 1.973으로 추정정확도가 가장 우수한 것으로 나타났다.

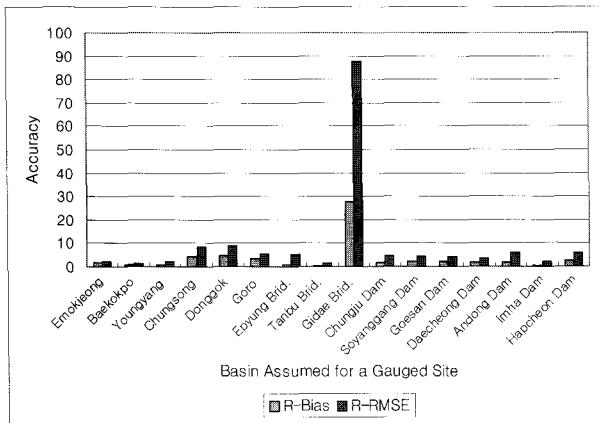


Fig. 3. Estimation Accuracy of the Baseflow Correlation Method for 15 Ungauged Basins Using 1 Gauged Basin shown in the X-axis

(2) 기저유량 상관계수에 따른 추정정확도

기저유량 상관계수는 0 이하, 0~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8, 0.8~1의 6개 구간으로 구분하였으며, R-Bias와 R-RMSE를 이용하여 추정정확도를 평가하였다. Fig. 4를 살펴 보면, 기저유량의 상관계수가 0.8~1 사이일 때 R-Bias와 R-RMSE가 가장 작게 나타나고 있어 추정정확도가 다른 구간들에 비해 우수한 것을 확인할 수 있다.

(3) 유역 간의 거리에 따른 추정정확도

유역 간의 거리는 0 km~50 km, 50 km~100 km, 100 km~150 km, 150 km 이상의 4개 구간으로 구분하였으며, R-Bias와 R-RMSE를 이용하여 추정정확도를 평가하였다. Fig. 5를 보면, 유역 간의 거리가 0~150 km까지는 R-Bias와 R-RMSE가 비슷한 값을 보이다가 150 km 이상에서 급하게 커지는 것을 확인할 수 있다.

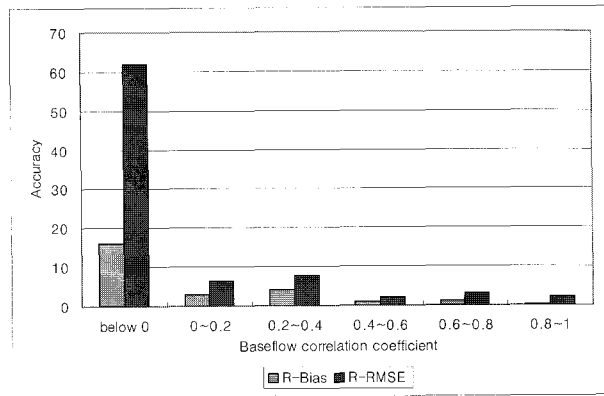


Fig. 4. Estimation Accuracy of the Baseflow Correlation Method According to Baseflow Correlation Coefficient

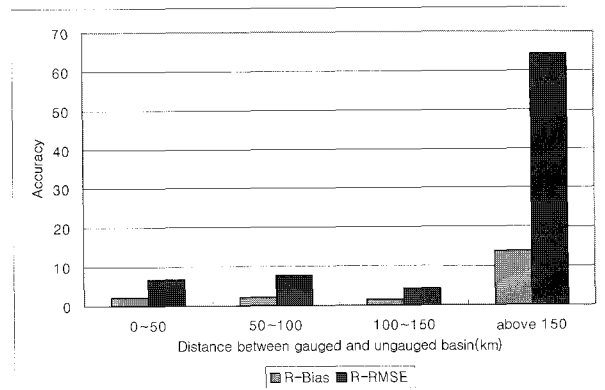


Fig. 5. Estimation Accuracy of the Baseflow Correlation Method According to Distance Between Gauged and Ungauged Basins

3.2.5 산정방법 간의 비교

비유량법에서는 기존의 방법과 충주댐과 안동댐을 계측유역으로 한 경우, 유역면적비가 0.9~1.2인 경우를 대상으로 하였으며, 지역회귀기법에서는 교차검증 결과가 가장 우수한 유역면적, 유역평균경사, 하천밀도에 의한 회귀식을 대상으로 하였고, 기저유량상관법에서는 계측유역을 탄부교와 임하댐으로 한 경우, 기저유량 상관계수가 0.8~1인 경우와 유역 간의 거리가 100 km ~ 150 km인 경우를 대상으로 비교해 보았다. Table 7은 각 산정방법의 추정정확도를 비교한 표이다. R-Bias와 R-RMSE 모두 지역회귀기법이 가장 작았으며, 그 다음으로 충주댐을 계측유역으로 한 비유량법이 작았다. R-Bias와 R-RMSE를 동시에 고려하였을 경우, 국내에 가장 적합하고 우수한 미계측유역의 갈수량 산정방법은 유역면적, 유역평균경사, 하천밀도를 설명변수로 하는 지역회귀기법인 것으로 판단된다. 이 방법은 기존의 비유량법보다 R-Bias는 0.363, R-RMSE는 0.673이 향상

Table 7. Comparison of Three Low Flow Estimation Methods

Methods		R-Bias	R-RMSE
Drainage-area ratio method	Previous	0.366	1.113
	Gauged basin: Chungju Dam	-0.226	0.635
	Gauged basin: Andong Dam	-0.384	0.812
	Drainage-area ratio: 0.9~1.2	-0.522	0.825
Regional regression method	<i>A, S, D</i>	-0.030	0.440
Baseflow correlation method	Gauged basin: Tanbu Bridge	0.475	1.224
	Gauged basin: Imha Dam	0.304	1.973
	baseflow correlation coefficient: 0.8~1	0.300	2.070
	Distance between ungauged and gauged basin: 100 km~150 km	1.541	4.392

되는 것을 확인할 수 있다.

기저유량상관법의 추정정확도가 다른 두 방법에 비해 불량한 것으로 나타나는데, 이는 유량자료만을 이용하여 갈수량을 추정하는 기저유량상관법의 특성상 우리나라 유량자료의 낮은 신뢰도가 반영된 것으로 사료된다. 또한 갈수량 추정에 사용된 미계측유역의 단기간의 기저유량 자료가 자료기간 전체를 대표하지 못하는 경우, 즉 유난히 가문 해 또는 유난히 유량이 풍부한 해의 기저유량 자료를 사용할 경우 왜곡된 갈수량 추정이 우려된다. 따라서 기저유량상관법의 국내 적용은 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 먼저 우리나라에서 사용되는 갈수량 지표인 평균갈수량과 기준갈수량, 미국에서 주로 사용되는 10년빈도 7일 갈수량의 비교를 통해 국내 갈수량 지표의 특징을 살펴보았다. 또한 미계측 유역의 갈수량 산정방법 중 비유량법을 검토해 보고, 지역회귀기법 그리고 기저유량상관법을 국내에 적용하여 각 방법의 적용시 지침과 국내에 가장 적합한 갈수량 산정방법을 제시하고자 하였다.

- 1) 일유량의 표준편차가 작아지고 lag-1 자기상관계수가 커질수록, 즉 유량자료의 지속성이 유지될수록 355일 유지유량이 최저 7일 평균유량보다 큰 해의 수가 증가하였다.
- 2) 과거 유량자료를 이용하여 평균갈수량과 10년빈도 7일 갈수량을 비교한 결과, 8개 유역 모두에서 평균갈수량이 10년빈도 7일 갈수량보다 큰 것으로

나타났으며, 이는 우리나라가 갈수기 자연하천의 유량을 미국보다 더 크게 평가하고 있으며, 이수 관리에 있어서 상대적으로 보수적인 경향을 가지고 있음을 보여준다.

- 3) 비유량법은 기존의 방법보다 충주댐 또는 안동댐 유역을 계측유역으로 사용할 경우 추정정확도가 우수하고, 유역면적비 (A_y/A_x)가 0.9~1.2인 계측유역을 이용하는 것이 평균갈수량 추정의 정확도를 높일 수 있다. 또한 유역면적비가 1.5 이상일 경우 추정정확도가 급격히 나빠져 작은 계측유역을 이용하여 큰 미계측유역의 평균갈수량을 추정하는 것은 위험하다.
- 4) 지역회귀기법에서는 유역면적, 유역평균경사, 하천밀도를 독립변수로 하는 회귀식이 가장 우수한 것으로 나타났으나, 본 연구에서 사용된 자료의 수가 적어 앞으로 꾸준한 개선이 필요하다.
- 5) 기저유량상관법을 적용할 경우, 계측유역은 탄부교와 임하댐 유역, 계측유역과 미계측유역의 기저유량 상관계수는 0.8~1일 때, 계측유역과 미계측유역 간의 거리가 150 km 이내인 경우 비교적 우수한 추정정확도를 기대할 수 있다.
- 6) 기존의 비유량법과 본 연구에서 검토한 갈수량 산정방법의 추정정확도를 비교한 결과, 국내 미계측유역의 갈수량 산정시 유역면적, 유역평균경사, 하천밀도를 고려한 지역회귀기법을 사용하는 것이 정확한 갈수량 추정을 위해 바람직하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 안양천 지역의 물순환 건전화 기술개발(과제번호 1-7-2)과 서울대학교 공과대학 공학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 건설교통부 (1997). **감천 하천정비기본계획(보완)보고서**. 보고서, 건설교통부.
- 건설교통부 (2002a). **금강수계 하천정비기본계획보고서**. 보고서, 건설교통부.
- 건설교통부 (2002b). **안양천 하천정비기본계획(보완)보고서**. 보고서, 건설교통부.
- 김경덕, 김돈수, 허준행, 김규호 (2003). "한강유역의 확률갈수량 추정기법 비교연구." **한국수자원학회 논문집**, 제36권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 315-324.
- 서울특별시 (2002). **성내천·감이천 하천정비기본계획보고서**. 보고서, 서울특별시.
- 안상진, 윤용남, 강관원 (1981). "금강수계의 하천형태학적 특성인자에 의한 갈수량 산정." **한국수자원학회지**, 제14권, 제1호, 한국수자원학회, pp. 31-37.
- 이명섭 (1993). 유역특성을 이용한 갈수량 산정에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.
- 이재형, 조기태 (1999). "미계측 산지하천 유역의 설계 갈수량 추정식 개발." **대한토목학회논문집**, 제19권, 제II-2호, 대한토목학회, pp. 169-181.
- 한국수자원공사 (1995). **하천유지유량 결정방법의 개발 및 적용**. 보고서.
- Arihood, L.D., and Glatfelter, D.R. (1991). "Method for estimating low-flow characteristics of ungaged streams in Indiana." *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2372*, U.S. Geological Survey.
- Fennessey, N., and Vogel, R.M. (1990). "Regional flow-duration curves for ungaged sites in Massachusetts." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 4, pp. 530-549.
- Flynn, R.H. (2003). "Development of regression

- equation to estimate flow durations and low-flow-frequency statistics in New Hampshire streams." *Water-Resources Investigations Report*, U.S. Geological Survey, Pembroke, New Hampshire.
- Parker, G.W. (1977). "Methods for determining selected flow characteristics for streams in Maine." *U.S. Geological Survey Open File Report*, U.S. Geological Survey.
- Reilly, C.F., and Kroll, C.N. (2003). "Estimation of 7-day, 10-year low-streamflow statistics using baseflow correlation." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 9, pp. 1236-1246.
- 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.
- Stedinger, J.R., and Thomas Jr., W.O. (1985). "Low-flow frequency estimation using base-flow measurements." *U.S. Geological Survey Open File Report*, 85-95.
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., and Foufoula-Georgiou, E. (1992). "Chapter. 18 Frequency analysis of extreme events." *Handbook of Hydrology*, edited by D.R. Maidment, McGraw-Hill.
- Thomas, D.M., and Benson, M.A. (1970). "Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics." *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*.
- Vogel, R.M., and Kroll, C.N. (1990). "Generalized low-flow frequency relationships for ungaged sites in Massachusetts." *Water Resources Bulletin*, Vol. 26, No. 2, pp. 241-253.
- Vogel, R.M., and Kroll, C.N. (1992). "Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 2451-2458.
- Wilson, J.T. (2000). "Evaluation of a method of estimating low-flow frequencies from base-flow

measurements at Indiana streams." *Water-resources Investigations Report*, U.S. Geological Survey, Indianapolis, Indiana.

(논문번호:06-84/접수:2006.08.10/심사완료:2006.12.27)