남강댐 유역의 네 가지 하천유량자료 확장방법 비교 및 평가

김경훈 · 정강영 · 윤종수 · 천세억^{*}

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Evaluation and Comparison of Four Streamflow Record Extension Techniques for Namgang Dam Basin

Gyeong-Hoon Kim · Kang-Young Jung · Jong-Su Yoon · Se-Uk Cheon[†]

Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 26 November 2013, Revised 14 January 2014, Accepted 15 January 2014)

Abstract

In this study, four methods for calculation of continuous daily flow was suggested using short-term or partial recording station of streamflow including missing data. Using these methods, standard flows at the outlet of unit/small basins for the management of total maximum daily loads (TMDLs) in Namgang dam basin were estimated from full-period flow duration curve (FDC). Four methods of extension are described, and their properties are explored. The methods are regression (REG), regression plus noise (RPN), and maintenance of variance extension types 1 and 2 (MOVE.1, MOVE.2). In these methods, the continuous daily flow was calculated using extension equation based on correlation analysis, after conducting the correlation analysis between historic record of streamflow and long-term recording station (a base station). Finally the best optimal method was selected as the MOVE.2, and the standard flows in the abundant, ordinary, low and drought flow estimated from FDC was evaluated using MOVE.2 in unit/small basins.

Key words : MOVE.1, MOVE.2, REG, RPN, Streamflow record extension technique, TMDLs

1. Introduction

유황곡선(Flow Duration Curve : FDC)은 하천의 전체 유량조건에 대한 유량변화를 분석하는 기법으로서, 수역의 장단기 유량변화 분석 및 수질변화 요인규명 등을 위한 중요한 도구로 사용되고 있다(Vogel and Fenessey, 1994). 수질 오염총량관리 단위유역에 대한 목표수질의 설정 또는 오염부하량의 할당 등에 필요한 유량조건은 단위유역별 유황곡선을 적용하여 분석한다(Park et al., 2012). 특히, 오염부하 지속곡선(Load Duration Curve : LDC)을 이용하여 목표수질 달성여부 등을 정밀분석 하기 위해서는 일유량자료를 바탕으로 한 장기유황곡선(Long Term Flow Duration Curve)의 작성이 선행되어야 한다(Park and Oh, 2012).

우리나라 4대강 수계에는 전국하천 수문조사를 위한 하천유량 측정망과 수질오염총량관리를 위한 총량유량 측정망이 운영되고 있다. 특히 총량유량 측정망에 의하여 단위유역에 대한 유량자료가 축적됨으로써 총량관리를 위한 장기유황곡선을 작성할 수 있는 기반이 조성되었다. 하천유량조건 중 평수량(Q185) 또는 저수량(Q275)과 같은 특정시점의 유량을 산정하기 위해서는 연간 365개의 일유량자료가 필요하다. 그러나 총량유량 측정망은 평균 8일 간격으로

연속유량측정이 이루어지지 않기 때문에 이 유량자료를 직접 이용하여 유황곡선을 작성하는 데는 한계점이 있다(NIER, 2012).

8일 간격으로 취득된 유량을 매일의 유량으로 환산하는 문제에 대한 연구들이 최근 많이 수행되고 있으며, 그 방법 또한 다양하다. 부분 계측 또는 미계측 유역에 대한 자료 확장 방법들(Streamflow Record Extension Techniques)로는 확장법, 백분위법, 면적비법, 지역회귀법, 강우유출모형 등이 있다. 확장법은 매일 연속 관측된 자료를 수문학적으로 동일 혹은 유사한 유역의 8일 간격으로 계측된 유량관측지점으로 전이하여 부분자료를 연속자료로 확장시키는 방법이다. 백분위법은 확장법과 달리 8일 간격 유량자료를 연속 일유량자료로 확장시키지 않고 부분 계측된 유량자료만을 가지고 유황분석을 실시하여 저수량을 산정하는 방식이다. GRI (2010) 연구보고서는 이 두 방법을 한강 수계 단위유역 말단 지점에서 관측된 연속 일유량자료와 비교하였는데, 백분위법은 저수량을 대체적으로 과소 산정하는 반면, 확장법의 결과는 관측된 저수량과 비교적 잘 일치하는 연구 성과를 얻었다고 보고하였다. 또한 확장법은 많은 수문학자들이 적용해 본 결과 아주 만족할 만한 결과를 제공해 주는 것으로 보고되었다(Hirsch, 1982). 면적비법은 유역의 면적만을 중요 변수로 간주하여 인근 유역이나 특정지점에서 계측 또는 추정된 유량값을 면적비를 대상 유역으로 전이시키는 방법이다. 지역회귀법은 면적비처럼

^{*} To whom correspondence should be addressed.
cheonseuk@korea.kr

하나의 인자에 비례하여 유량을 추정하는 것이 아니고, 유량에 영향을 미치는 유역특성치들을 다수 감안하여 회귀분석을 통해 경험식을 만들어 유량을 추정하는 방법이다. 면적비법은 국내 실무에서 가장 많이 사용되는 미계측 유역의 유량산정방법이다. 미국 Massachusetts 주에서는 유역면적비가 0.3에서 1.5 사이일 때 이 방법을 사용할 것을 권장하고 있다(Ries and Friesz, 2000). 지역회귀법은 국·내외에서 많이 사용되는 방법(Smakhtin, 2001)으로 홍수량에 비해 갈수량 산정에서 제한적인 성공을 거두었다(Cho et al., 2007). 강우유출모형은 강우량을 입력자료로 하는 수문모형을 사용하여 자연유출량을 계산해 내는 방법이다. 우리나라에서는 주로 유역 강우유출모형을 구축하여 일유량을 모의하고 총량관리 단위유역에 대한 유황분석 및 오염부하지속 곡선 작성 등을 위한 연구들이 수행되었다(Kim and Kim, 2009; Kim and Kim, 2007; Kim et al., 2007). 그러나 유출모형을 기반으로 유량자료를 생산하는 방식은 계속된 유량자료가 부족할수록 유용하게 쓰일 수 있으나, 계산과정에서의 오차와 불확실성이 늘 결과치에 내포되어 있다. 또한 입력자료의 구축에서부터 매개변수의 추정 등 유출모형을 이용하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 보다 간단한 방법인면서 계속된 유량자료들만을 가지고 부분유량을 연속유량으로 확장하는 방법이 개발되어야 하는 필요성이 있다(Baek and Yim, 2012; Hirsch, 1982).

본 연구에서는 단기간 또는 부분 결측치를 포함한 하천 유량자료가 있을 때 이를 연속적인 일유량으로 확장할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이 방법론은 관심지점 인근에 장기간의 관측기록을 보유한 기준관측소와의 상관성이 입증된 경우 자료를 보완하는 방식이다. 이를 위해 두 지점간의 상관성 분석을 실시한 후, 상관도가 높다면 이를 잘 표현하는 확장식을 개발하고 이 식을 통해 결측치를 보완한다. 본 연구에서는 남강댐 상류유역에 위치한 8일 간격으로 계속된 유량자료를 일유량자료로 확장할 수 있는 네 가지 확장방법을 적용하여 확장식을 개발하고 그 정확성을 비교하여 최적의 확장식을 제안하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 기본 통계량

미국지질조사국(USGS)은 부분 계속된 유량자료를 연속 유량자료로 확장하는 방법을 이용할 경우 인근에 존재하는 연속 계속관측소의 유량자료를 이용할 것을 권장하고 있다. 이 확장법은 y 관측소(부분계측관측소)의 결측치를 동일 유역 혹은 수문학적 유사 유역의 x 관측소(연속계측관측소)의 자료를 이용하여 보완하는 방법이다.

모집단의 기준관측소 측정자료(장기간 기록을 보유한 관측소)를 $x(i)$ 라고 하고, 부분계측관측소 측정자료를 $y(i)$ 라고 하자. 여기서 i 는 시간간격이다. 이 두 관측치를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$x(1), \dots, x(N_1), x(N_1 + 1), \dots, x(N_1 + N_2) \\ y(1), \dots, y(N_1)$$

Table 1. Definitions of sample statistics

Statistic	Definition
Sample mean of	
$m(x_1)$	$x(1), \dots, x(N_1)$
$m(x_2)$	$x(N_1 + 1), \dots, x(N_1 + N_2)$
$m(x)$	$x(1), \dots, x(N_1), x(N_1 + 1), \dots, x(N_1 + N_2)$
$m(y_1)$	$y(1), \dots, y(N_1)$
$m(\bar{y})$	$y(1), \dots, y(N_1), y(N_1 + 1), \dots, y(N_1 + N_2)$
Sample variance of*	
$S^2(x_1)$	$x(1), \dots, x(N_1)$
$S^2(x_2)$	$x(N_1 + 1), \dots, x(N_1 + N_2)$
$S^2(x)$	$x(1), \dots, x(N_1), x(N_1 + 1), \dots, x(N_1 + N_2)$
$S^2(y_1)$	$y(1), \dots, y(N_1)$
$S^2(\bar{y})$	$y(1), \dots, y(N_1), y(N_1 + 1), \dots, y(N_1 + N_2)$
Product moment correlation coefficient of	
r	$x(1), \dots, x(N_1)$ and $y(1), \dots, y(N_1)$

Note: * Variance computed with sample size minus 1 as the divisor

Source: Hirsch(1982)

여기서 N_1 는 단기간의 기록을 보유한 관측기간을, $(N_1 + N_2)$ 는 장기간의 기록을 보유한 관측기간을 나타낸다.

결측치의 추정치를 $\hat{y}(i)$, $i = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2$ 이고, 완벽하게 확장된 기록치를 $\bar{y}(i)$, $i = 1, \dots, N_1, N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2$ 라고 하자. 여기서,

$$\bar{y}(i) = y(i) \quad i = 1, \dots, N_1$$

$$\bar{y}(i) = \hat{y}(i) \quad i = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2$$

이다.

Table 1은 전통적으로 사용되는 다양한 표본 통계량에 대한 정의를 정리하여 수록한 것이다. 일련의 x 와 y 간의 선형관계식의 기본가정은 두 계열간의 관계가 정상적이고, 계열 독립적이며, 그리고 μ_x , μ_y , σ_x^2 , σ_y^2 및 ρ 모수들을 가진 이변량 정규확률분포를 따르는 것으로 가정한다. 여기서 μ_x , μ_y , σ_x^2 , σ_y^2 는 x 와 y 계열의 모집단 평균과 분산값이다. 그리고 ρ 는 모집단의 상관계수값이고, $\rho\sigma_y/\sigma_x$ 는 모집단 선형회귀식의 기울기값이다. 이들 통계량은 다음 절에서 소개될 네 가지 확장방법들의 정의 방정식에 이용된다.

2.2. 네 가지 확장방법

2.2.1. 선형회귀법

첫 번째 확장방법으로 선형회귀법(Regression : REG)이 있다. 이 방법이 결측값 보완을 위해 사용한 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{y}(i) = a + bx(i) \quad (1)$$

여기서 a 와 b 회귀계수 결정은 Z 값의 최소값으로 정의한다.

$$Z = \sum_{i=1}^{N_1} (\hat{y}(i) - y(i))^2 \quad (2)$$

a 와 b 회귀계수는 연립 방정식의 해법을 통해 구할 수 있으며, 식 (1)의 최적해는 다음과 같이 다시 재정리할 수 있다.

$$\hat{y}(i) = m(y_1) + r \frac{S(y_1)}{S(x_1)} (x(i) - m(x_1)) \quad (3)$$

Matalas and Jacobs (1964)에 따르면 $m(\bar{y})$ 는 μ_y 의 불편 추정치이지만, $S^2(\bar{y})$ 는 $\rho^2 < 1.0$ 에서는 σ_y^2 의 편향추정치라고 하였다. 특히,

$$E[m(\bar{y})] = \mu_y \quad (4a)$$

$$E[S^2(\bar{y})] = \sigma_y^2 \left\{ 1 - \frac{1 - \rho^2 N_2 (N_1 - 4)}{(N_1 + N_2 - 1)(N_1 - 3)} \right\} \quad (4b)$$

이다.

Table 2는 N_1 과 N_2 에 ρ 조합에 따른 $E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2$ 값을 수록한 것이다. 기록확장법은 수문학적 극치값(홍수 또는 가뭄)의 강도와 지속시간을 추정하는데 일반적으로 사용되는 방법이다. Table 2 결과로 볼 때 REG로 추정된 분산 추정치(편향 추정치)는 일관되게 과소 추정되는 결과를 보여주고 있다. 다음에 소개하는 세 가지 방법은 이들 분산 편향(bias)을 제거(또는 최소화)하는 방법들에 대해 소개할 것이다.

Table 2. Values of $E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2$ using the REG method of record extension

N_1	N_2	ρ		
		0.5	0.7	0.9
10	10	0.66	0.77	0.91
20	20	0.64	0.75	0.91
30	30	0.63	0.75	0.91
50	10	0.88	0.92	0.97
10	50	0.46	0.63	0.86

Source: Hirsch(1982)

2.2.2. 잡음을 내포한 선형회귀법

Matalas and Jacobs (1964)에 의해 제안된 잡음을 내포한 선형회귀법(Regression Plus Independent Noise : RPN)은 식 (5)와 같이 $\hat{y}(i)$ 을 계산하면 평균과 분산에 대한 불편향추정치를 얻을 수 있다고 입증하였다.

$$\begin{aligned} \hat{y}(i) = m(y_1) + r \frac{S(y_1)}{S(x_1)} (x(i) - m(x_1)) \\ + \alpha (1 - r^2)^{1/2} S(y_1) e(i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $e(i)$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 무작위 정규확률

변수이다. 또한 α 는 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha^2 = \frac{N_2(N_1 - 4)(N_1 - 1)}{(N_2 - 1)(N_1 - 3)(N_1 - 2)} \quad (6)$$

RPN의 $\hat{y}(i)$ 추정치는 역사적으로 관측된 확률변수 $x(i)$ 와 이와는 무관한 컴퓨터로 생성된 무작위 변수 $e(i)$ 의 혼합형이다. 일단 일련의 계열에 무작위 숫자를 사용하여 추정하기 때문에 추정된 결과를 이용한 의사결정시 상당한 어려움이 따를 것이고, 추정된 결과값이 서로 동일하지 않기 때문에 의사 결정이 매우 어려운 단점을 지니고 있다. 그럼에도 불구하고 RPN 방법은 평균과 분산에 대한 불편향추정치를 제공하는 것으로 알려져 있다.

2.2.3. 분산유지법 형식-1

Hirsch(1982)는 RPN 방법의 대안으로 앞서 언급한 식 (1)의 회귀계수 a 와 b 결정은 오차의 제곱합이 최소화하는 조건을 만족하는 대신 표본 평균과 분산을 유지하는데 중점을 두는 분산유지법(Maintenance of Variance Extension, Type 1 : MOVE.1)을 제안하였다. 이 방법은 추정치와 관측치 간의 관계가 아래 두 식의 조건을 만족하는 회귀계수 a 와 b 를 결정하면 된다.

$$\sum_{i=1}^{N_1} \hat{y}_i = \sum_{i=1}^{N_1} y_i \quad (7a)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} (\hat{y}_i - m(y_1))^2 = \sum_{i=1}^{N_1} (y_i - m(y_1))^2 \quad (7b)$$

위 두 연립방정식의 해를 구하여 정리하면 $\hat{y}(i)$ 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{y}(i) = m(y_1) + \frac{S(y_1)}{S(x_1)} (x(i) - m(x_1)) \quad (8)$$

식 (3)과 (8)은 매우 유사하지만 서로 다른 조건을 만족하여야 한다. 즉, 식 (3)의 $\hat{y}(i)$ 는 오차제곱합이 최소가 되는 것에 초점을 둔 반면, 식 (8)의 $\hat{y}(i)$ 의 표본 평균과 분산은 $y(i)$ 의 표본 평균과 분산이 동일하다는 가정에 초점을 두었다는 점이다. 이 방정식을 기록확장법에 사용할 경우 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E(m(\bar{y})) = \mu_y \quad (9a)$$

$$E[S^2(\bar{y})] = \frac{\sigma_y^2}{N_1 + N_2 - 1} \left\{ N_1 - 1 + N_2 \left(\frac{N_1 - 1 - 2\rho^2}{N_1 - 3} \right) \right\} \quad (9b)$$

Table 3은 N_1 과 N_2 에 ρ 조합에 따른 $E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2$ 값을 수록한 것이다. Table 2와 3의 수록 결과를 살펴보면 REG

Table 3. Values of $E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2$ using the MOVE.1 method of record extension

N_1	N_2	ρ		
		0.5	0.7	0.9
10	10	1.19	1.08	1.03
20	20	1.05	1.03	1.03
30	30	1.03	1.02	1.01
50	10	1.01	1.00	1.00
10	50	1.18	1.12	1.05

Source: Hirsch(1982)

보다 MOVE.1의 편향값이 훨씬 적은 것을 확인할 수 있다. 그리고 REG는 분산에 대해 과소 추정하지만 MOVE.1은 과대 추정하는 것을 확인할 수 있다. 또한 $N_1 \rightarrow \infty$ 일 경우 $S^2(y)$ 은 점근적으로 σ_y^2 의 불편향된 추정치이다.

2.2.4. 분산유지법 형식-2

MOVE.1은 첫 번째 N_1 으로부터 추정된 x 와 y 의 평균과 분산 등 총 4개의 계수값을 사용한다. MOVE.2는 이와 동일한 계수값을 사용하지만 이들에 대한 추정은 보다 많은 정보를 기초로 하여 추정된 계수값을 요구한다. MOVE.2의 확장방정식은 다음과 같다.

$$\hat{y}(i) = \hat{m}(y_1) + \frac{\hat{S}(y_1)}{S(x_1)}(x(i) - m(x_1)) \quad (10)$$

x 에 대한 평균과 분산 추정치는 모든 관측값 $N_1 + N_2$ 을 기초로 하고, y 에 대한 평균과 분산 추정치는 y 에 대한 기록치들과 일련의 x 와 관련된 정보를 기초로 추정된다. $\hat{m}(y)$ 와 $\hat{S}^2(y)$ 계수값은 Matalas and Jacobs (1964)에 의해 개발되었고, 이들 값은 μ_y 와 σ_y^2 의 불편향된 추정치이다.

$$\hat{m}(y) = m(y_1) + \frac{N_2}{N_1 + N_2} r \frac{S(y_1)}{S(x_2)} \times (m(x_2) - m(x_1)) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}^2(y) = & \frac{1}{N_1 + N_2 - 1} \{ (N_1 - 1) S^2(y_1) \} \\ & + (N_2 - 1) r^2 \frac{S^2(y_1)}{S^2(x_1)} S^2(x_2) + (N_2 - 1) \alpha^2 (1 - r^2) S^2(y_1) \\ & + \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} r^2 \frac{S^2(y_1)}{S^2(x_1)} (m(x_2) - m(x_1))^2 \end{aligned} \quad (12)$$

위와 같이 복잡한 식을 개발한 것은 평균과 분산에 대한 편향을 막기 위한 이론적 해법을 제공하기 위한 것이다. N_1 과 N_2 에 ρ 대한 총 15개의 다른 조합을 총 2,000번에 해당하는 Monte Carlo 모의결과 귀무가설 $E[m(\bar{y})] = \mu_y$ 는 조건을 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 대부분 만족하는 것으로 분

Table 4. Values of $E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2$ using the MOVE.2 method of record extension

N_1	N_2	ρ		
		0.5	0.7	0.9
10	10	0.99	0.99	1.02*
20	20	0.99	1.00	1.00
30	30	0.99	0.99	1.00
50	10	1.00	0.99	1.01
10	50	0.99	1.01	1.00

Note: Based on 2,000 Monte Carlo trials

* The hypothesis $H_0: E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2 = 1.00$ is rejected at the 5% level.

Source: Hirsch(1982)

석되었다. Table 4는 N_1 과 N_2 에 ρ 조합에 따른 $E[S^2(\bar{y})]/\sigma_y^2$ 값을 수록한 것이다. Table 4의 모든 분석결과를 살펴볼 때 MOVE.2는 $\hat{m}(y)$ 와 $\hat{S}^2(y)$ 에 대해서 불편향된 값을 제공함으로써 기록확장법에 만족할 만한 결과를 제공할 것으로 판단된다.

3. Results and Discussion

3.1. 적용대상유역

앞서 제안된 부분 계측 유량자료를 연속 일유량자료로 확장하는 기록확장법을 실제 유역에 적용해 보았다. 대상유역은 환경부에서 설정한 낙동강수계 수질오염총량관리 단위유역 및 단위유역 내 모니터링 지점 중 남강댐 상류유역에 포함된 지점들이다. 기록확장법의 적용에 있어서 가장 중요한 것은 신뢰할 수 있는 장기간의 기록을 보유한 기준 관측소의 선정에 달려 있다. 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서는 각 표준유역에서 PRMS(Precipitation-Runoff Modeling System)로 계산된 42여년(1966~2008년)간의 유출량 분석결과를 제공하고 있다. PRMS는 USGS에서 개발한 강우-유출모형으로 일종의 준분포형 모형이다. 이 모형은 지표수 유출은 물론이고, 지하수의 유출입 및 복류수 거동도 잘 모의하는 것으로 알려져 있다(GRI, 2010). 본 연구에서는 기준관측소로 남강댐 중권역 말단지점으로 선정하였으며, 일유출량은 PRMS 모형 및 남강댐 일유입량 자료를 비교·분석하여 총 47여년(1966~2012년)간의 장기간 기록을 보유한 자료로 구축하였다. Fig. 1에 제시된 부분 계측지점은 총 9개 지점으로 남강 단위유역 2개(남강A, 남강B)와 단위유역 내 모니터링유역 7개(남강Aa, 남강A1, 남강A2, 남강B2, 남강B3, 남강B1, 남강C1)이고, 연속 계측지점은 남강댐 1개 지점이다. Table 5에는 분석에 사용된 부분/연속 계측지점의 지점번호, 지점명, 하천명, 자료기간 및 유역면적 등에 대한 정보가 수록되어 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 부분 계측지점의 자료기간은 3~9년이고, 연속 계측지점의 자료기간은 47년이다.

기준관측소인 남강댐 유역의 총면적 2,285.0 km²(낙동강 전체 31,785 km²의 7.2%에 해당)으로서 행정구역은 3개 시·도, 9개 시·군, 4개 읍, 1개동 51개 면으로 구성되어 있

Fig. 1. Study area and location of streamgaging stations used in the analysis.

Table 5. MOE unregulated and base streamgaging stations in Namgang dam basin

NO	Station number	Station name	Name of river	Period of record	Drainage area in square kilometers	Remarks
1	2018513	Namgang-Aa	Ramcheon	2004-2012	145.6	Boundary County
2	2018516	Namgang-A1	Obongcheon	2010-2012	20.2	Boundary County
3	2018535	Namgang-A2	Imcheon	2010-2012	465.0	Boundary County
4	2018505	Namgang-A	Gyeonghogang	2004-2012	1,018.7	Unit Basin
5	2018519	Namgang-B2	Sindeungcheon	2010-2012	52.5	Boundary County
6	2018557	Namgang-B3	Yangcheon	2010-2012	146.9	Boundary County
7	2018518	Namgang-B1	Migokcheon	2010-2012	24.5	Boundary County
8	2018510	Namgang-B	Gyeonghogang	2004-2012	1,709.9	Unit Basin
9	2018580	Namgang-C1	Deokcheongang	2010-2012	254.1	Boundary County
10	2018110	Namgang Dam	Namgang	1966-2012	2,285.0	Base Station

Note. MOE (Ministry of Environment)

다(NRBEQ, 2008). 남강댐 유역 47년(1966 ~ 2012년)간의 유출량 분석결과를 요약하면 풍수량 $36.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 평수량 $17.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 저수량 $9.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 갈수량 $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 연평균유량 $71.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 연총량은 22.6 억만톤으로 분석되었다. 티센가중평균법을 이용한 유역평균 연강수량은 $1,491.8 \text{ mm}$ 로서 본 유역의 유출고 983.4 mm 대비 63.8% 유출률을 보이는 것으로 분석되었다.

3.2. 기록확장법 비교, 평가 및 선정

장기간의 기록 확장이 필요한 지점으로 남강댐 상류유역 9개 지점에서 8일 간격으로 부분 계측이 이루어진 날짜와 동일한 날의 유량을 기준관측소 연속유량자료로부터 추출하였다. 동일한 일자에서 추출된 두 자료를 기반으로 위에서 소개한 네 가지 기록확장법에 따라 확장식을 유도하고, 이들 식의 비교·평가를 통해 최적의 확장식을 선정된 뒤,

Fig. 2. Comparison of four record extension methods.

Table 6. Evaluation and comparison of four streamflow record extension methods

NO	Station number	Station name	Method	r	RMSE	Extension equation	Remarks
1	2018513	Namgang-Aa	REG	0.89	0.22	$Y = -0.496 + 0.805 X +$	○
			RPN	0.78	0.32	$Y = -0.496 + 0.805 X + 0.223 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.89	0.23	$Y = -0.629 + 0.905 X +$	
			MOVE.2	0.89	0.23	$Y = -0.596 + 0.880 X +$	●
2	2018516	Namgang-A1	REG	0.79	0.28	$Y = -1.779 + 0.815 X +$	○
			RPN	0.62	0.39	$Y = -1.779 + 0.815 X + 0.287 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.79	0.30	$Y = -2.083 + 1.036 X +$	
			MOVE.2	0.79	0.29	$Y = -1.951 + 0.944 X +$	●
3	2018535	Namgang-A2	REG	0.71	0.45	$Y = -1.133 + 0.996 X +$	○
			RPN	0.44	0.65	$Y = -1.133 + 0.996 X + 0.455 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.71	0.49	$Y = -1.697 + 1.405 X +$	
			MOVE.2	0.71	0.47	$Y = -1.488 + 1.261 X +$	●
4	2018505	Namgang-A	REG	0.91	0.20	$Y = -0.017 + 0.789 X +$	
			RPN	0.80	0.30	$Y = -0.017 + 0.789 X + 0.199 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.91	0.20	$Y = -0.126 + 0.871 X +$	
			MOVE.2	0.91	0.20	$Y = -0.097 + 0.846 X +$	○●
5	2018519	Namgang-B2	REG	0.90	0.23	$Y = -1.771 + 1.024 X +$	○
			RPN	0.81	0.33	$Y = -1.771 + 1.024 X + 0.235 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.90	0.24	$Y = -1.931 + 1.139 X +$	
			MOVE.2	0.90	0.24	$Y = -1.849 + 1.086 X +$	●
6	2018557	Namgang-B3	REG	0.94	0.23	$Y = -2.207 + 1.384 X +$	
			RPN	0.89	0.31	$Y = -2.207 + 1.384 X + 0.232 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.94	0.23	$Y = -2.327 + 1.469 X +$	
			MOVE.2	0.94	0.23	$Y = -2.247 + 1.419 X +$	○●
7	2018518	Namgang-B1	REG	0.93	0.26	$Y = -2.919 + 1.351 X +$	
			RPN	0.87	0.35	$Y = -2.919 + 1.351 X + 0.259 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.93	0.26	$Y = -3.070 + 1.459 X +$	
			MOVE.2	0.93	0.26	$Y = -2.981 + 1.402 X +$	○●
8	2018510	Namgang-B	REG	0.90	0.21	$Y = 0.096 + 0.836 X +$	
			RPN	0.80	0.31	$Y = 0.096 + 0.836 X + 0.210 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.90	0.22	$Y = -0.021 + 0.926 X +$	
			MOVE.2	0.90	0.21	$Y = 0.012 + 0.896 X +$	○●
9	2018580	Namgang-C1	REG	0.93	0.16	$Y = -0.651 + 0.996 X +$	
			RPN	0.90	0.20	$Y = -0.651 + 0.996 X + 0.165 \times e(i)$	
			MOVE.1	0.93	0.17	$Y = -0.753 + 1.070 X +$	
			MOVE.2	0.93	0.16	$Y = -0.677 + 1.017 X +$	○●

NOTE. r : Correlation Coefficient, RMSE : Root Mean Square Error
 $Y = \log_{10}(y)$, $X = \log_{10}(x)$
 Remarks : ○ Minimum RMSE, ● The Best Extension Method

선정된 확장식을 통해 부분유량을 연속유량으로 확장하였다. 여기서 주의할 점은 추출된 두 자료간의 선형 상관성을 확보하기 위해 원자료에 대한 자료변환이 필요하다. 즉, 원래 유량자료에 상용로그(Common logarithm)를 취한 값으로 확장식을 유도하게 된다(Ries and Friesz, 2000).

9개 지점 중 남강A와 남강B3에 네 가지 방법을 적용한 결과를 Fig. 2에 도시하였고, 각 지점별 확장식은 Table 6에 수록하였다. Table 6에는 9개 지점에 적용된 네 가지 방법별 확장식을 산정한 후, 상관계수(r)와 평균계급오차(RMSE) 산정결과를 이용하여 최적 확장식을 선정하였다. 먼저 두 자료간의 상관계수(r)를 살펴보면, REG, MOVE.1, MOVE.2에서는 0.71~0.94사이를 RPN에서는 0.44~0.90사이인 것으로 분석되어, RPN의 상관성이 다른 세 방법들과 비교하여 다소 떨어지는 것으로 분석되었다. 또한 REG, MOVE.1, MOVE.2의 상관계수는 모두 동일한 결과값을 가짐에 따라 어느 방법이 우월한지 논하기가 쉽지 않다. 다음으로 RMSE 산정결과를 보면 REG에서 최소 오차(RMSE)인 지점은 남강Aa, 남강A1, 남강A2 그리고 남강B2 4개이고, MOVE.2에서 최소 오차인 지점은 남강A, 남강B3, 남강B1, 남강B 그리고 남강C1 5개 지점인 것으로 분석되었다. Matalas and Jacobs (1964)에 따르면 REG 방법에 의해 추정된 표본 분산은 편향추정치이고, 모집단 분산값을 과소추정하는 것으로 보고하였다. 또한 확장법을 적용하는 실제의 사례에서는 확장하고 싶은 지점과 멀리 떨어진 지점, 혹은 수문학적으로 유사한 타 유역에서 연속자료를 이용하는 경우 상관도가 낮아질 뿐만 아니라, 표본 추정치(표본과 분산값)들이 편의될 가능성이 높아질 것이다. 본 연구성과를 보면 REG와 MOVE.2의 RMSE 비교결과 통계적으로 유의할 정도의 차이를 보이는 곳은 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 최적의 확장법 선택은 분산 추정치에 불편향치를 제공하는 RPN, MOVE.1, MOVE.2 방법 중에서 최소 RMSE를 보인 MOVE.2로 선정하였다.

3.3. 전기간 유황곡선 작성

총량관리 관측수질에 대한 유량과의 관계 및 목표수질

초과원인 등을 분석하기 위하여 오염부하지속곡선을 활용할 수 있으며, 이 곡선을 작성하기 위해서는 전체 유량조건에 대한 유황곡선이 필요하다(U.S.EPA, 2007). 이 곡선은 총량관리 목표수질 평가 및 분석 등에 활용하기 위해서는 계획기간 동안에 나타날 수 있는 전체 유량조건을 파악하여야 하므로 모든 유량조건을 포함하는 전기간 유황곡선을 작성하여야 한다(Park et al., 2012). 오염총량 기본방침의 기준유량 산정은 과거 10년간의 평균평수량 및 평균저수량을 기준유량으로 사용하도록 되어있다. 그러나 본 연구에서는 장기간의 기록을 보유한 기준관측소로부터 확장된 47년간의 유량자료를 이용하여 유황곡선을 작성하였다.

Fig. 3은 1966~2012년까지 남강A와 남강B3 지점에 대한 전기간 유황곡선을 작성한 결과이다. 이와 같은 전기간 유황곡선으로부터 전체 유량조건 및 주요 순위유량 등을 산정할 수 있다. Table 7은 남강댐 상류유역 9개 지점에 대한 전기간(47년) 유황곡선으로부터 산정된 주요 유황시기(풍수량, 평수량, 저수량 그리고 갈수량)의 기준(순위)유량을 산정한 최종 결과이다.

Table 7. Major standard flow on stations in Namgang dam basin

NO	Station name	Flow(CMS)			
		Abundant	Ordinary	Low	Drought
1	Namgang-Aa	6.017	3.107	1.870	0.646
2	Namgang-A1	0.334	0.164	0.095	0.031
3	Namgang-A2	3.031	1.176	0.568	0.124
4	Namgang-A	16.828	8.910	5.469	1.966
5	Namgang-B2	0.705	0.312	0.167	0.045
6	Namgang-B3	0.933	0.322	0.142	0.026
7	Namgang-B1	0.162	0.057	0.025	0.005
8	Namgang-B	25.790	13.159	7.851	2.659
9	Namgang-C1	8.160	3.802	2.115	0.619

4. Conclusion

수질오염총량관리제의 기준유량은 ‘하천 수질이 가장 좋지 않을 때 수질을 관리해야 한다.’는 취지하에 과거 10년

(a) Namgang-A

(b) Namgang-B3

Fig. 3. Full-period FDC of MOVE.2 record extension method.

간의 평균 평수량(또는 저수량)으로 규정하고 있다. 여기서 총량관리를 위한 기준유량 산정 및 목표수질 평가 등을 위해서는 하천 유량조건에 대한 분석이 필요하며, 이를 위해 연속적인 일유량자료를 이용한 유황곡선을 산정하여 활용하여야 한다. 본 연구는 동일유역에서 계측된 신뢰할 수 있는 장기간의 기록을 보유한 기준관측소 유량자료를 전이하여 8일 간격 유량을 연속유량으로 확장하는 방법들을 소개하고 그 적용성을 검토하였다. 확장법은 연속 계측된 자료를 기반으로 부분 계측된 자료를 보정하는 방식으로 기준관측소의 유량자료의 품질이 매우 우수할 경우 더 나은 결과를 제공할 수 있다. 또한 두 자료간의 상관성이 어느 정도 입증될 경우 비교적 간단한 절차와 방식으로 유량자료를 확장할 수 있다는 매우 큰 장점을 지니고 있다. 추후 본 연구 성과를 토대로 낙동강수계 8일 간격 유량자료들에 대한 장기간 확장식 및 유황곡선 개발을 위한 후속연구가 수행되어야 할 것이다.

또한 위 확장식(선형관계식)의 기본가정은 오차항의 분산이 동질하다는 가정이 성립할 경우에 사용 가능하고, 오차항의 분산이 이질적인 경우에는 그 사용성이 제한된다. 유량은 시공간적 변화가 매우 심한 자연현상으로 그 참값을 정확하게 알 수 없는 불확실성을 내포한 인자이다. 따라서 위와 같은 기본 가정을 위배하는 경우 적용 가능한 통계적 분석기법들에 대한 후속 연구들이 계속해서 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- Baek, K. O. and Yim, D. H. (2012). Extension Techniques of 8 Day Interval Recorded Stream-flow, *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(1), pp. 91-99.
- Cho, T. G., Kim, Y. O., and Lee, K. S. (2007). Improving Low Flow Estimation for Ungauged Basins in Korea, *Korea Journal of Water Resources Association*, 40(2), pp. 113-124. [Korean Literature]
- Gyeonggi Research Institute (GRI). (2010). *Study on Evaluating Low Flow in Ungauged Basin*, Gyeonggi Research Institute, Policy Report 2010-33, pp. 1-37. [Korean Literature]
- Hirsch, R. M. (1982). A Comparison of Four Streamflow Record Extension Techniques, *Water Resources Research*, 18(4), pp. 1081-1088.
- Kim, C. G., and Kim, N. W. (2009). Derivation of Continuous Pollutant Loadograph using Distributed Model with 8-Day Measured Flow and Water Quality Data of MOE, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(1), pp. 332-338. [Korean Literature]
- Kim, J. C. and Kim, S. D. (2007). Flow Duration Curve Analysis for Nakdong River Basin using TMDL Flow Data, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(3), pp. 332-338. [Korean Literature]
- Kim, S. D., Kang, D. K., Kim, M. S., and Shin, H. S. (2007). The Possibility of Daily Flow Data Generation from 8-Day Intervals Measured Flow Data for Calibrating Watershed Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(1), pp. 64-71. [Korean Literature]
- Matalas, N. C. and Jacobs B. A. (1964). *A Correlation Procedure for Augmenting Hydrologic Data*, U.S. Geological Survey Professional Paper 434-E, pp. E1-E7.
- Nakdong River Basin Environmental Office (NRBEO). (2008). *Water Environment Management Plan in Namgang Dam Middle Zone*, Nakdong River Basin Environmental Office, 11-1480000-000952-01, pp. 9-10.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Development of Long Term Flow Duration Curves for the Management of TMDLs*, National Institute of Environmental Research, NIER-RP2012-220, pp. 1-37.
- Park, J. D. and Oh, S. Y. (2012). Methodology for the Identification of Impaired Waters Using LDC for the Management of Total Maximum Daily Loads, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(5), pp. 693-703. [Korean Literature]
- Park, J. D., Oh, S. Y., and Choi, Y. H. (2012). Development of a Flow Duration Curve with Unit Watershed Flow Data for the Management of Total Maximum Daily Loads, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(2), pp. 224-231. [Korean Literature]
- Ries, K. G. and Friesz, P. J. (2000). *Methods for Estimating Low-Flow Statistics for Massachusetts Streams*, Water-Resources Investigations Report 00-4135, U.S. Geological Survey Northborough, Massachusetts, pp. 1-81.
- Smakhtin, V. U. (2001). Low Flow Hydrology: a Review, *Journal of Hydrology*, 240, pp. 147-186.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (2007). *An Approach for Using Load Duration Curves in the Development of TMDLs*, EPA 841-B-07-0006, pp. 1-68.
- Vogel, R. M. and Fenessey, N. M. (1994). Flow-duration Curves, I: New Interpretation and Confidence Intervals, *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 120(4), pp. 485-504.