



# 낙동강 수계에서의 하천유량 변동성과 기저유출 기여도의 관계 분석

## A Study on Relationship between Streamflow Variability and Baseflow Contribution in Nakdong River Basin

한정호\* · 임경재\* · 정영훈\*\*,†

Han, Jeong Ho · Lim, Kyoung Jae · Jung, Younghun

### Abstract

More severe and frequent flood and drought have increased the attentions on the river management. In particular, baseflow is an important element among many streamflow characteristics because streamflow is mainly consisted of direct runoff and baseflow. In this regard, this study attempted to analyze the relationship between streamflow variability and baseflow contributions on Nakdong river basin. For this, two Streamflow Variability Indices (SVI) were used: Coefficient of Variation (CV) and Coefficient of Flow Regime (CFR). Furthermore, baseflow separation was individually conducted by three methods (PART, WHAT and BFLOW), and based on this, Baseflow Index (BFI) was calculated. Also, we used the daily streamflow data retrieved from 27 gauge stations in Nakdong river basin for baseflow separation. The results showed that BFI calculated by three models ranges from 0.14 to 0.90 for 27 gauge stations. For SVI, BFI has much higher correlation with CV than with CFR. Also, the inversely proportional relationship between BFI and CV showed that higher baseflow contribution, less streamflow variability.

**Keywords:** Streamflow; Streamflow variability; Baseflow; BFI; SVI

### 1. 서 론

하천의 기능은 크게 홍수를 방어하고 조절하는 치수기능과 농업용수/생활용수/공업용수 등의 목적으로 물을 공급하는 이수기능 그리고 자정작용, 생태서식처 등의 환경기능을 가지고 있다(Sato et al., 2012; Luo et al., 2012). 하지만 기후변화와 도시화는 하천 수문환경을 변화시켜 하천의 기능은 과거에 비하여 저하되었다(Park et al., 2010; Yoon and Lee, 2004). 하천의 기능이 저하되면서 홍수와 가뭄의 발생빈도와 그로 인한 피해가 심각해졌으며 이 외에도 수질오염, 하천 건천화, 수생태계의 건강성 악화 등의 많은 문제가 발생하고 있다(Kumar and Merwade, 2012). 이에 하천기능 저하를 방지하고 하천기능 복원을 위하여 다양한 하천관리 방안들에 대한 연구가 진행되었다(Haddeland et al., 2014; Traylor et al., 2013).

하천유량의 변동성 분석은 하천관리를 위한 가장 기초

적인 단계이다. 특히 우리나라의 하천은 해외 주요 하천들과 비교하여 여름철에 집중된 강우패턴으로 매우 큰 하천유량의 계절변동성을 가지고 있다. 하천유량 변동성은 강우량 외에도 도시화로 인한 불투수층의 증가, 댐이나 보와 같은 수리구조물 등과 같은 인위적인 요인과 강수량, 기온, 증발산량, 대수층 특성, 직접유출과 기저유출의 기여도 등의 자연적인 요인들에 의해 영향을 받는다(Taylor et al., 2013; Zhang et al., 2012; Suriya et al., 2012). 특히 다양한 자연적인 요인들 중 직접유출과 기저유출의 기여도는 하천유량 변동성에 많은 영향을 미친다. 직접유출과 기저유출은 하천유량을 구성하는 기본 요소로, 직접유출이란 강우사상이 발생했을 경우 비교적 단시간에 흘러 들어가는 유출을 말하며 기저유출이란 청천 시 하천의 유량의 대부분을 구성하는 유출로 비가오지 않을 때 이전에 내린 비가 대수층을 통해 오랜 시간에 걸쳐 유출되는 것을 말한다. 일반적으로 하천 유량 중 직접유출이 차지하는 비중이 높을 경우 강우사상 시 단시간 내에 많은 양의 유량이 하천으로 공급되어 하천의 유량이 증가하면서 홍수발생에 취약할 수 있다. 반면 기저유출의 기여도가 큰 하천은 대수층으로부터 꾸준히 흘러나오는 기저유출에 의해 상대적으로 안정적인 유량 확보가 가능하여 하천 유량의 변동이 작다. 특히 갈수기의 하천유량의 대부분이 기저유출에 의존하고 있기 때문에 하천유량의 변동성을 파악하기 위해서는 기저유출

\* Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

\*\* Water Resources Research Center, K-water Institute

† Corresponding author

Tel.: +82-42-870-7473 Fax: +82-42-870-7499

E-mail: [younghun@kwater.or.kr](mailto:younghun@kwater.or.kr)

Received: January 12, 2016

Revised: January 15, 2016

Accepted: January 18, 2016

기여도에 대한 정확한 분석이 필요하다 (Lim et al. 2005; Stewart et al. 2007). 기저유출 기여도에 관한 국내 연구 사례를 살펴보면 Hong et al. (2015)는 한강수계를 대상으로 한강수계에서의 직접유출과 기저유출의 기여도를 정량화한 결과 한강수계의 기저유출비는 0.42에서 0.78의 범위를 가지며 전체 관측소의 76 %가 50 %를 넘는 기저유출비를 가지고 있다고 보고한바 있다. 또한, Lee et al. (2014)는 토지이용변화에 따른 기저유출량을 산정한 결과 토지이용변화가 기저유출의 계절별 특성에 많은 영향을 준다고 보고하였다.

기저유출 기여도 분석을 위해서는 먼저 하천유량을 직접유출과 기저유출로 분리하는 과정이 필요하다. 기저유출 분리 방법은 크게 그래프를 이용한 분리 방법 (Graphical Separation Method)과 필터를 이용한 분리 (Filter Separation Method) 방법 두 가지로 구분된다 (Brodie, R.S., and S. Hostetler, 2005). 그래프를 이용한 방법은 유출수문곡선을 이용하여 직접유출이 발생하는 지점부터 감수부분 (falling limb)이 끝날 때까지 기저유출 그래프를 어떻게 그릴지에 따라 세부적으로 나뉜다. 대표적인 방법으로는 수평직선분리법, N-day 법, 수정 N-day 법 등이 있다. 하지만 그래프를 이용한 기저유출 분리 방법은 기저유출 분리 과정 중 주관적 요소가 반영될 가능성이 있기 때문에 필터를 이용한 분리 방법에 비해 객관성이 떨어지는 단점이 있다.

반대로 필터를 이용한 기저유출 분리 방법은 유량과 유역 면적만을 고려하기 때문에 수문특성을 고려하지 못하는 단점이 있다. 하지만 필터를 이용한 방법은 그래프를 이용한 방법에 비해 객관적이고 과정이 단순하여 장기간에 걸친 기저유출 분리가 가능한 장점이 있다 (Brodie, R.S., and S. Hostetler, 2005). 따라서 최근 들어 기저유출 연구에서는 필터를 이용한 방법이 많이 사용되고 있으며, 많은 연구에서 기저유출 분리를 위해 필터를 이용한 기저유출 분리 방법이 사용되고 있다 (Eckhardt, 2008; Lim et al., 2005; Mason-deese et al., 2013). 이에 본 연구에서는 1) 낙동강 수계에 위치해 있는 하천에 대해 다양한 SVI 및 기저유출을 산정하고 2) 하천유량 변동성과 기저유출 기여도의 관계를 분석하고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상지역

우리나라는 전체 국토면적의 약 70 %가 산지로 이루어져 있기 때문에 하천경사가 급하고, 동쪽에 태백산맥이 위치하

Table 1 Topographic characteristics of Nakdong river basin

Area (km <sup>2</sup> )	Mean width (km)	Mean elevation (m)	Mean slope (%)	Extension flow path (km)	Total Length (km)
23690.32	46.28	290.51	37.03	511.01	6,8871.97

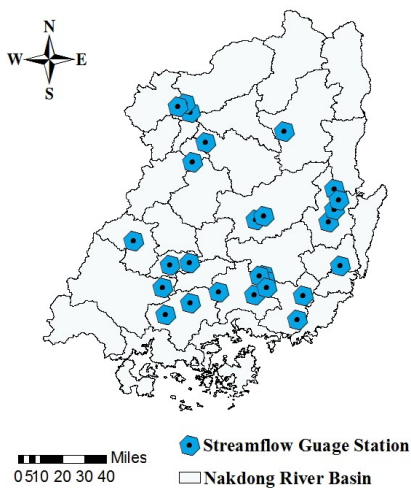
고 있기 때문에 동쪽이 높고 서쪽이 낮은 지형적 특징으로 대부분의 큰 하천은 서해와 남해 쪽으로 발달되어 있다. 우리나라의 수계는 크게 금강 수계, 낙동강 수계, 한강 수계, 영산강-섬진강 수계 총 4개의 수계로 이루어져 있으며, 대부분의 주요 하천에는 댐, 보와 같은 수리구조물이 설치되어 있다 (Bae et al., 2007). 그 중 본 연구의 대상인 낙동강 수계의 면적은 23,690 km<sup>2</sup>로 한강 수계 다음으로 두 번째로 큰 수계이다 (Table 1). 낙동강 수계는 몬순기후의 영향으로 연강수량의 약 70 % 이상이 여름철에 집중되어있으며, 겨울과 봄은 건기에 해당한다. 이러한 계절별 강수특성으로 인하여 매우 큰 하천유량 변동성을 나타내고 있다. 따라서 건기에도 안정적인 하천유량 확보를 위해서는 하천유량에 대한 기저유출의 기여도 분석은 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 기술적/시간적/비용적 한계로 국내에는 활용 가능한 기저유출 관측 자료 확보가 어려운 상황이다. 이에 본 연구에서는 유량 관측 자료로부터 기저유출을 분리하는 방법을 활용하여 기저유출을 분석하고자 하였다.

### 2. 유량관측소 및 유량자료

본 연구에서는 하천유량의 변동성과 기저유출 기여도를 분석하기 위해 국토교통부에서 운영하고 있는 국가수자원관리 종합정보시스템 (Water management information system, WAMIS)에서 제공하는 유량 자료를 활용하였다. 유량관측소는 국토교통부, 수자원공사, 한국수력원자력에서 운영하고 있으며, 본 연구대상 지역인 낙동강 수계에 위치한 유량관측소는 총 200개이다. 하지만 유량관측소에서 제공하고 있는 유량자료의 관측 기간과 형태가 관측소에 따라 다르기 때문에 본 연구에서는 정확한 하천유량 변동성 분석과 기저유출 분리를 위하여 전체 200개의 유량관측소 중 최근 5년 (2009~2014)에 대하여 연속된 유량자료를 제공하는 유량관측소를 선별하였으며, 선별된 유량관측소의 5년 기간 유량자료만을 사용하였다. 유량관측소 선정 결과 결측치가 없는 연속된 최근 5년 유량자료를 제공하는 유량관측소는 총 27개소였다 (Table 2). Fig. 1은 27개 관측소의 위치를 나타낸 그림이다.

**Table 2** Locations of streamflow gauge stations in Nakdong river basin

Station	Area (km <sup>2</sup> )	Longitude	Latitude
Geochang 2	181	127-55-31	35-42-54
Gyeongju 2	445	129-12-06	35-50-17
Gupo	23289	128-59-37	35-12-13
Gigye2	159	129-14-18	36-03-07
Gil-An	412	128-54-39	36-25-54
Dalji	6375	128-17-46	36-33-20
Daegog	2659	128-08-13	35-14-15
Daepyeong	93	128-43-25	35-51-07
Moa	646	129-14-25	35-55-16
Milyang1	1265	128-46-44	35-29-40
Milyang2	1331	128-47-07	35-27-40
Sanyang	215	128-15-39	36-36-41
Samga	104	128-07-03	35-24-49
Sammun	1295	128-44-50	35-29-21
Samho	421	129-16-31	35-33-14
Seonsan	977	128-18-32	36-13-40
Susan	20997	128-42-51	35-21-55
Angang	908	129-15-55	35-58-52
Yangsang	184	129-02-10	35-21-27
Yonggog	1318	128-23-53	36-21-29
Jeomchon	608	128-13-00	36-35-22
Jeongam	3283	128-17-43	35-18-48
Juggo	1333	128-17-34	35-34-19
Jindong	20311	128-29-01	35-23-00
Hayang	1139	128-46-45	35-52-41
Habcheon	946	128-09-40	35-33-27
Hwaseong	979	128-47-48	35-24-39



**Fig. 1** Locations of streamflow gauge stations in Nakdong river basin

### 3. 하천유량 변동성 지표 (Streamflow Variability Index; SVI)

일반적으로 하천유량 변동성이란 1년을 주기로 일 단위, 월 단위 또는 계절 단위로 유량 변화 폭의 크고 작음을 의미한다 (Dettinger and Diaz, 2000). 이런 하천유량 변동성을 정량화하기 위해 국내·외적으로 다양한 SVI가 개발되었다. 본 연구에서는 국내 하천유량 변동성 연구에서 가장 많이 활용되고 있는 변동계수와 유황계수 2가지의 SVI를 이용하였다.

#### 가. 변동계수 (Coefficient of Variation; CV)

통계학에서 변동계수 (Coefficient of Variation; CV)는 서로 다른 자료의 산포도를 나타내기 위해 사용되는 지표로써, 수문학에서 변동계수는 하천유량 변동성을 분석하기 위해 많이 사용되고 있다. 변동계수를 활용한 하천유량 변동성 연구의 몇 가지 사례를 살펴보면, Déry et al. (2011)은 변동계수를 사용하여 캐나다 Hudson Bay의 연도별 유량 변동성과 10년 단위 수문 특성의 변화를 분석하였다. Strauch et al. (2015)는 변동계수를 활용하여 열대기후를 가진 유역을 대상으로 강우 패턴의 변화가 하천유량에 대해 어떠한 영향을 미치는지 평가하였다. 국내 사례로 Hong et al. (2015)은 한강수계를 대상으로 변동계수를 활용하여 한강유역의 일유량 변동성과 하천유량에 대한 기저유출의 기여도의 관계를 분석하였다. 변동계수는 표준편차를 산술평균으로 나누어 계산되며, 식 (1)에서  $\sigma$ 는 표준편차,  $\bar{x}$ 는 평균을 나타낸다.

$$\text{Coefficient of Variation} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

#### 나. 유황계수 (Coefficient of Flow Regime; CFR)

유황계수는 하천유량 변동성을 분석하기 위하여 하상계수와 함께 국내에서 가장 널리 사용되는 지표이다. 유황계수를 제시한 Lee et al. (1993)은 홍수량을 대표하는 지속기간 10일 유량 ( $Q_{10}$ )을 갈수량을 대표하는 지속기간 355일 유량 ( $Q_{355}$ )으로 나눈 값을 유황계수로 정의하였다 (식 (2)). 여기서, 유황계수의 값이 큰 하천일수록 하천유량의 변동성이 크다는 것을 의미한다. Kang et al. (2010)은 유황계수를 이용하여 금강유역에서 댐에 의한 하천유량의 변동특성 변화를 분석하였으며, Lee et al. (2013)는 금강 유역을 대상으로 유황계수와 유황곡선을 바탕으로 서로 다른 유역을 대상으로 유역의 유사성을 평가 하였다.

$$\text{Coefficient of Flow Regime} = Q_{10} / Q_{355} \quad (2)$$

#### 4. 스케일재조정 (Re-scaling) 방법

유황계수와 변동계수는 산정방법의 차이로 인해서 두 계수의 값은 서로 상이한 범위를 나타낸다. 이 때문에 유황계수와 변동계수를 자료의 가공 없이 비교하기에는 한계가 있다. 따라서 서로 다른 범위를 가진 두 계수를 비교하기 위해 유황계수와 변동계수가 동일한 범위를 가지도록 표준화하는 과정이 필요하였다. 본 연구에서는 Nardo et al. (2005)가 제안한 여러 가지 표준화 방법 중에서 스케일재조정 (Re-scaling) 방법을 활용하여 두 계수를 표준화하였다. 스케일재조정 방법은 해당 변수의 전체 값 중에서 최대값과 최소값을 이용하여 변수의 범위를 0~1로 표준화하는 방법이다 (식 (3)).

$$D_i^t = \frac{x_i^t - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}} \quad (3)$$

여기서  $D_i^t$ 는  $t$ 에서 표준화된 대리변수  $i$ 의 값,  $x_i^t$ 는  $t$ 에서 대리변수  $i$ 의 값,  $x_i^{min}$ 는 대리변수  $i$ 의 최소값,  $x_i^{max}$ 는 대리변수  $i$ 의 최대값이다

#### 5. 기저유출 분리

본 연구에서는 하천유량에 대한 기저유출의 기여도와 하천유량 변동성의 관계를 분석하고자 유량관측소에서 제공하는 일평균유량 자료를 바탕으로 기저유출을 분리 하였다. 그러나 동일한 유량자료를 사용하여 기저유출을 분리하더라도 기저유출 분리 방법에 따라 결과값에 차이가 발생할 가능성이 있다. 이 점을 고려하여 본 연구에서는 다양한 기저유출 분리 모델을 사용하여 기저유출을 분리하였으며, 각 모델의 기저유출 분리 결과를 활용하여 하천유량 중 기저유출의 기여도를 나타내는 기저유출비 (Baseflow Index; BFI)를 산정하였다.

##### 가. PART (A computerized method of baseflow record estimation)

USGS에서 개발한 PART (Rutledge, 1998)는 일 평균유량 자료를 활용하여 하천유량으로부터 기저유출을 분리하기 위해 널리 사용되고 있다. 침투유출이 발생하여 직접유출이 끝날 때 까지 걸린 시간 ( $N$ : characteristic response time)을 구하여 시간 변수 (time window)  $2N$ 을 산정하여 기저유출을 분리하는데 식 (4)는  $N$ 을 산정하는 식이다. 식 (4)에서  $A$ 는 유역 면적을 뜻하며 단위는 mile이다.  $N$ 의 지수 (여기서는 0.2)는

유역의 특성 (지형, 토지이용도 등)에 따라 달라질 수 있다. 시간 변수 (time window)  $2N$ 은 3~11 사이의 홀수 정수 중 가까운 값을 가지며 (Brodie and Hostetler, 2005; Schwartz et al., 2012), 일 단위 선형 보간을 통해 하천유량으로부터 기저유출을 분리한다 (Schwartz et al, 2012).

$$N = A^{0.2} \quad (4)$$

##### 나. WHAT (Web based Hydrograph Analysis Tool)

WAHT은 유량자료로부터 기저유출 분리에 있어 사용자 편의를 위해 웹기반으로 개발된 기저유출 분리 모델이다 (Lim et al. 2005; Shin et al., 2010). WHAT 모델에는 Local Minimum Method (LMM), BFLOW filter (Lyne and Hollick, 1979), Eckhardt filter (Eckhardt, 2005) 총 3가지의 방법이 있다. LMM 방법은 수문곡선이 감소하다 증가하는 점들 가운데 지역의 최소값을 직선으로 연결하여 기저유출을 분리하는 방법이다. BFLOW filter는 저주파수 신호로부터 고주파수 신호를 분리하기 위해 신호 분석에서 사용되는 방법을 이용하여 수문곡선으로부터 기저유출을 분리하는 방법이다. Eckhardt filter (식 (5))는 하천유량 중 기저유출비를 뜻하는 BFI (Baseflow Index) 중 최대값에 해당하는 값을 변수로 활용하여 대수층의 특성을 고려할 수 있는 방법으로, 사용자가 직접 값을 입력할 수 있다. 하지만 잘못된 BFI<sub>max</sub>를 사용할 경우 잘못된 기저유출 분리 결과가 나올 수 있기 때문에 Eckhardt (2005)는 항시 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층, 단속적으로 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층, 항시 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층에 대하여 각각 0.80, 0.50, 0.25로 값을 제안하였다 (Lim et al., 2010; Eckhardt, 2005). 본 연구에서는 대수층의 특성을 고려한 기저유출 분리 방법인 Eckhardt filter 방법을 사용하였으며 토양환경정보시스템 (<http://soil.rda.go.kr/soil>)에서 제공하는 배수등급 통계자료를 기반으로 낙동강 수계의 BFI<sub>max</sub>를 항시 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층에 해당하는 0.80을 적용하였다. 식 (5)에서  $b_k$ 는 시간  $k$ 에서의 필터링 된 기저유출,  $b_{k-1}$ 은  $k-1$  시간단계에서 필터링 된 기저유출, BFI<sub>max</sub>는 총 유량에서 기저유출의 장기 비율 값,  $a$ 는 필터의 매개변수,  $y_k$ 는  $k$  시간단계에서의 총 유량을 의미한다.

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{max})ab_{k-1} + (1 - a)BFI_{max}y_k}{1 - aBFI_{max}} \quad (5)$$

##### 다. BFLOW

BFLOW filter (Anorld and Allen, 1999)는 신호 분석에서

저주파수 신호에서부터 고주파수를 신호를 분리하기 위해 사용되는 Lyne-Hollick filter equation (식 (6))을 이용하여 기저유출을 분리하는 방법이다.

$$f_k = a \cdot f_{k-q} + \frac{1+a}{2}(y_k - y_{k-1}) \quad (6)$$

$$b_k = y_k - f_k \quad \text{단, } 0 \leq b_k \leq y_k$$

여기서  $y_k$ 는 일 평균유량,  $f_k$ 는 직접유출,  $b_k$ 는 기저유출,  $a$ 는 filter parameter이다. BFLOW filter는 총 세 번 (first pass, second pass, third pass)에 걸쳐 filter를 통과시킬 수 있는데 사용자가 원하는 값을 선택하여 사용할 수 있다 (Eckhardt, 2008; Schwartz et al., 2012; Lyne and Hollick, 1979).

### 6. 기저유출비(Baseflow Index; BFI)

하천유량에 대한 기저유출 기여도를 정량화하기 위하여 각각의 기저유출 분리 모델을 통해 분리한 기저유출 분리 결과를 활용하여 27개 관측소에 대한 BFI를 산정하였다. BFI란 장기간에 걸쳐 전체 하천유량 중에서 기저유출이 차지하고 있는 비율로써, 지리적 특성과 식생 그리고 기후의 영향을 받는다. 선행연구를 통해 BFI가 홍수 및 저유량 (regional flood and low flow)를 분석하기 위한 지표로써도 유용하다는 것이 검증되었으며, 최근에는 이 외에도 다양한 연구에 적용되고 있다. BFI는 두 가지의 방법으로 계산할 수 있는데, 첫 번째 방

법은 전체 기간에 대해 한번에 기저유출 분리를 한 후 각 연도 별 BFI를 계산(식 (7))하는 것이다. 두 번째 방법은 전체기간에 대해 기저유출 분리를 한번에 계산하는 것이 아니라, 연도별로 기저유출을 분리하여 BFI를 산정하는 것이다. 두 번째 방법을 이용할 시에는 1월 초와 12월 말에 해당하는 기간의 유량자료를 제외하고 BFI를 산정하여야 한다 (Gustard et al., 1992; Deelstra and LITal. 2008). 본 연구에서는 두 번째 방법을 이용하여 2009년에서 2013년까지 연도 별 BFI를 산정한 후 그 값의 평균값을 계산하여 5년 기간에 대한 BFI를 산정하였다.

$$BFI = V_B / V_A \quad (7)$$

여기서  $V_A$ 는 일 평균유량의 합,  $V_B$ 는 기저유출량의 합이다.

## III. 결과 및 토의

### 1. 변동계수 및 유황계수

본 연구에서는 낙동강 수계에 위치한 200개의 유량관측소 중 27개의 유량관측소를 선정하여 각 유량관측소에 대한 5년 평균 유량과 SVI를 산정하였다 (Table 3). Fig. 2은 변동계수와 유황계수를 5개 등급으로 나눈 후 이를 공간적인 분포로 나타낸 것이다. Fig. 2에서 파란색에서 색이 연해질수록 SVI 값이 작은 곳을 나타낸다. 또한 27개 유량관측소의 5년 평균

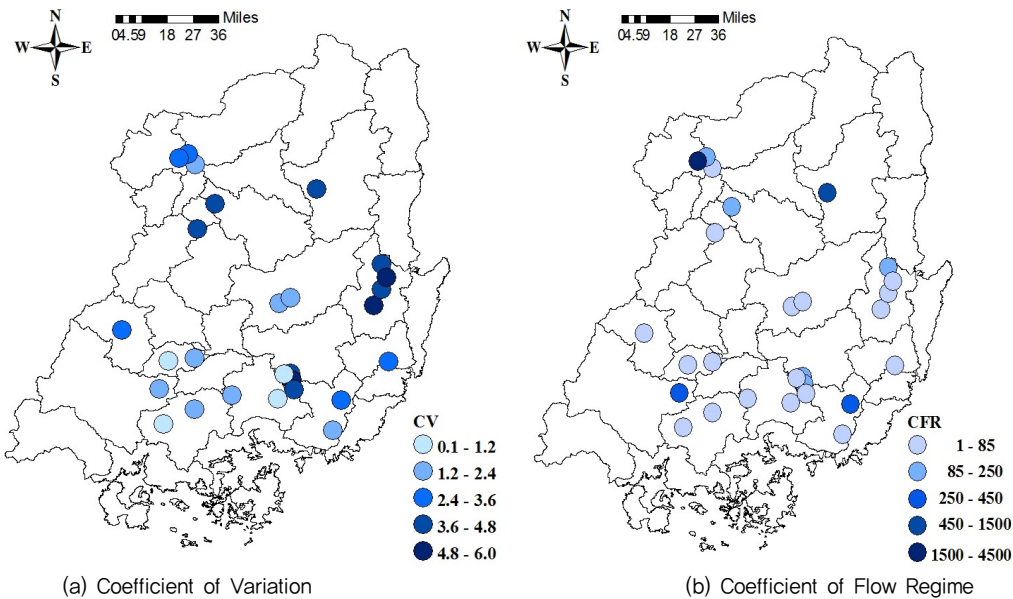


Fig. 2 The calculated SVIs in Nakdong river basin

Table 3 SVI calculation result

Station	Original		Standardization		Average daily streamflow (m <sup>3</sup> /sec)
	CV	CFR	CV	CFR	
Geochang 2	3.0	71.9	0.49	0.02	701.7
Gyeongju 2	5.9	71.0	1.00	0.02	371.8
Gupo	1.4	28.7	0.20	0.01	339.6
Gigye2	4.6	172.9	0.78	0.04	113.8
Gil-An	4.2	1462.0	0.70	0.36	96.3
Dalji	2.0	33.2	0.30	0.01	76.0
Daegog	1.1	10.9	0.14	0.00	68.1
Daepyeong	2.0	15.8	0.31	0.00	67.7
Moa	4.3	34.3	0.71	0.01	36.3
Milyang1	3.7	226.6	0.61	0.06	30.9
Milyang2	4.9	165.9	0.82	0.04	29.1
Sanyang	3.1	204.0	0.51	0.05	22.9
Samga	1.7	419.8	0.25	0.10	19.5
Sammun	0.3	4.3	0.00	0.00	18.0
Samho	2.7	22.3	0.43	0.01	15.7
Seonsan	3.7	1.0	0.61	0.00	15.1
Susan	0.8	3.3	0.10	0.00	14.6
Angang	4.8	58.7	0.81	0.01	14.4
Yangsang	2.5	432.8	0.40	0.11	14.1
Yonggog	3.7	191.8	0.60	0.05	13.6
Jeomchon	2.8	4057.1	0.45	1.00	11.3
Jeongam	2.1	82.3	0.33	0.02	9.9
Juggo	1.5	8.7	0.22	0.00	8.9
Jindong	2.1	55.6	0.32	0.01	6.3
Hayang	1.3	14.1	0.18	0.00	4.6
Habcheon	0.5	5.4	0.04	0.00	4.0
Hwaseong	3.7	5.4	0.62	0.00	1.2
Minimum	0.3 (Sammun)	3.3 (Seonsan)	0	0	1.2 (Hwaseong)
Maximum	5.9 (Gyeongju 2)	4057.1 (Jeomchon)	1	1	701.7 (Geochang 2)
Average	2.67	208.81	0.44	0.07	78.7

일유량을 산정한 결과 기계2 관측소가 1.2 m<sup>3</sup>/s로 가장 작게 나타났으며 수산 관측소가 701.7 m<sup>3</sup>/s로 가장 큰 것으로 나타났다. 5년 평균 일유량의 최대값과 최소값은 700.5 m<sup>3</sup>/s의 차이를 보여 다양한 유량 크기를 가지는 하천을 대상으로 본 연구를 수행하였음을 알 수 있다.

Table 3에서 알 수 있듯이 27개 유량관측소의 SVI 산정 결과 변동계수의 범위는 0.28~5.89였으며 평균값은 2.67로 산정되었다. 최소값은 0.29로 삼문 관측소에서 나타났으며, 최

대값은 5.90으로 경주 관측소에서 나타났다. 즉, 변동계수로 각 유량관측소의 하천유량 변동성을 비교분석한 결과 삼문 관측소의 하천유량 변동성이 가장 작고 안정적인 것으로 분석됐으며, 경주 관측소의 하천유량 변동성이 가장 크고 불안정한 것으로 나타났다. 각 유량관측소에 대하여 유황계수를 산정한 결과 유황계수의 범위는 1.01~4057.13로 변동계수와 비교하여 매우 큰 범위를 나타냈으며, 평균값은 208.81으로 나타났다. 유황계수의 최소값은 1.01로 선산 관측소에서 나



타났으며, 최대값은 4,057.13로 점촌 관측소에서 나타났다. 즉, 선산 관측소에서 유량 변동성이 가장 작은 것으로 나타났으며, 점촌 관측소에서 유량 변동성이 가장 큰 것으로 나타났다. 변동계수와 유황계수 두 SVI의 결과값 차이는 두 SVI의 산정방법으로 인한 차이로 판단되었다. 먼저 변동계수의 경우 연중 일평균유량 자료를 모두 사용하여 하천유량 변동성을 나타내기 때문에 하루하루의 하천유량 변동 폭의 변화 정도를 의미한다. 반대로 유황계수의 경우 대표 홍수량과 대표 갈수량만을 사용하여 하천유량 변동성을 나타내기 때문에 하루하루 하천유량의 변동 폭을 나타내는 것이 아니라 이상 홍수와 이상 가뭄을 배제한 연중 하천유량 변동 폭의 최대값을 의미한다. 즉, 변동계수와 유황계수 모두 하천유량 변동성을 나타내기 위한 지표이지만 두 SVI가 의미하는 하천유량 변동성의 의미에 확연한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 하천유량 변동성 차이에 대한 의미를 정확히 조사하기 위하여 추후 변동계수, 유황계수, 그리고 그 외 여러 SVI의 특성 분석에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 2. BFI 산정 결과 및 분석

본 연구에서는 하천유량으로부터 기저유출을 분리하기 위해 3가지 (WHAT, PART, BFLOW) 모델을 사용하여 각 유량관측소 별 BFI를 산정하였다 (Table 4). Fig. 3는 본 연구에서 유량자료를 활용한 27개 유량관측소에 대하여 각 모델 별 BFI 산정결과의 공간적 분포를 나타낸 그림이다.

Table 5에서 모델 별 BFI 최대값을 비교했을 때 WHAT의 최대값이 0.76으로 상대적으로 작은 값이 나온 것을 알 수 있는데, 이는 대수층의 특성을 고려하기 위한 변수인  $BFI_{max}$  값을 ‘항시 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층’에 해당하는 0.8을 사용하였기 때문이다. 또한 BFLOW-second pass와 BFLOW-third pass를 통해 산정된 BFI는 다른 방법의 결과

Table 4 BFI calculation results

Station	PART	BFLOW			WHAT	Max-min
		First	Second	Third		
Geochang 2	0.49	0.53	0.36	0.28	0.52	0.04
Gyeongju 2	0.41	0.47	0.32	0.25	0.46	0.06
Gupo	0.78	0.86	0.80	0.76	0.72	0.14
Gigye 2	0.43	0.47	0.30	0.24	0.47	0.04
Gil-An	0.27	0.37	0.20	0.14	0.39	0.12
Dalji	0.55	0.63	0.49	0.43	0.60	0.08
Daegog	0.66	0.73	0.62	0.54	0.66	0.07
Daepyeong	0.74	0.74	0.68	0.65	0.67	0.07
Moa	0.51	0.56	0.41	0.34	0.54	0.05
Milyang 1	0.42	0.50	0.33	0.26	0.49	0.08
Milyang 2	0.33	0.42	0.26	0.20	0.43	0.1
Sanyang	0.50	0.50	0.34	0.26	0.49	0.01
Samga	0.72	0.72	0.63	0.58	0.66	0.06
Sammun	0.90	0.84	0.73	0.65	0.72	0.18
Samho	0.65	0.63	0.52	0.46	0.60	0.05
Seonsan	0.41	0.51	0.34	0.26	0.51	0.1
Susan	0.74	0.86	0.81	0.79	0.75	0.12
Angang	0.41	0.49	0.34	0.27	0.49	0.08
Yangsan	0.73	0.71	0.60	0.53	0.65	0.08
Yonggog	0.36	0.46	0.30	0.24	0.46	0.1
Jeomchon	0.50	0.48	0.29	0.21	0.48	0.02
Jeongam	0.45	0.56	0.40	0.31	0.55	0.11
Juggo	0.73	0.75	0.66	0.61	0.69	0.06
Jindong	0.39	0.59	0.43	0.36	0.57	0.2
Hayang	0.77	0.77	0.67	0.62	0.70	0.07
Habcheon	0.90	0.89	0.82	0.77	0.76	0.14
Hwaseong	0.59	0.66	0.58	0.55	0.60	0.07

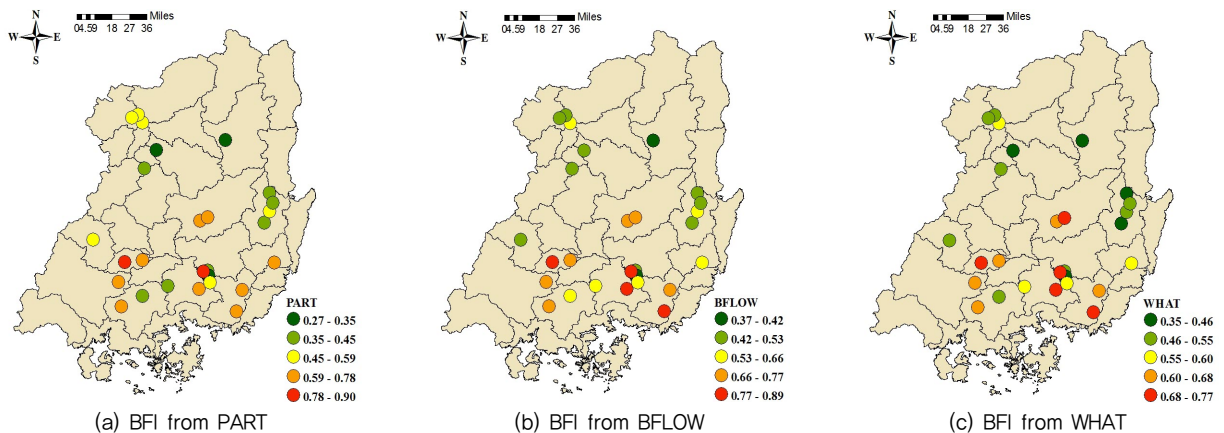
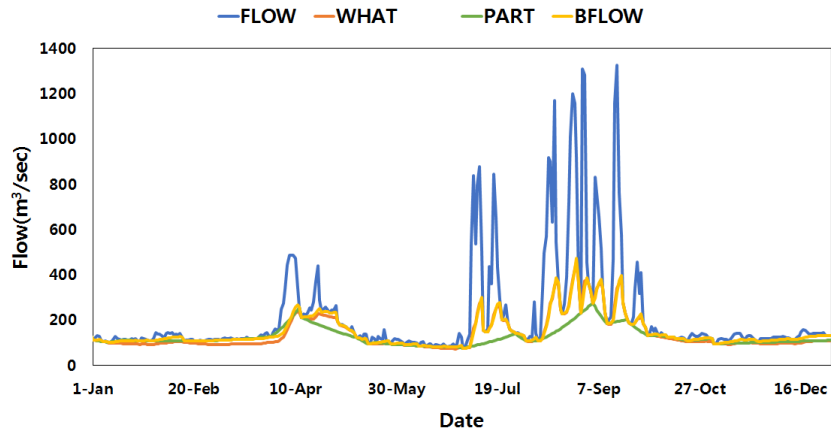


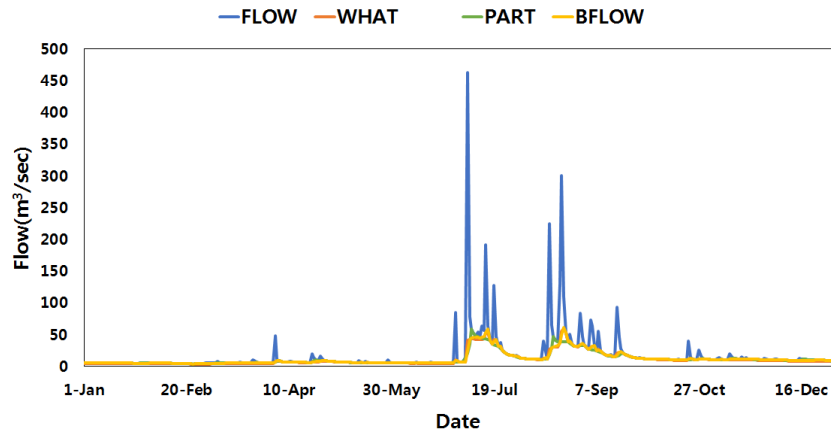
Fig. 3 Spatial distribution of BFI

Table 5 Maximum, minimum and average of BFI

Value	PART	BFLOW			WHAT
		First	Second	Third	
min	0.27	0.37	0.2	0.14	0.39
max	0.9	0.89	0.82	0.79	0.76
avg	0.57	0.62	0.49	0.43	0.58



(a) Gupo streamflow gauge station



(b) Samga streamflow gauge station

Fig. 4 Baseflow separation result in Gupo and Samga gauge stations

와 비교했을 때 매우 작은 값을 나타냈다. 특히 third pass의 경우 상대적으로 기저유출 기여도를 매우 작게 산정하기 때문에 BFLOW를 사용하여 기저유출을 분리할 때에는 first pass 또는 second pass의 결과를 일반적으로 사용되고 있다 (Eckhardt, 2008). 본 연구에서는 first pass를 사용하였다.

모델별로 5년 평균 BFI 산정 결과(Table 4)를 분석한 결과 PART는 0.90으로 삼문 관측소와 합천 관측소에서 최대값이 나타났으며, 최소값은 0.27로 길안 관측소에서 나타났다. BFLOW의 경우 최대값은 0.89로 합천 관측소에서 나타났으며, 최소값은 0.37로 길안 관측소에서 나타났다. 다음 WHAT

의 최대값은 0.76으로 합천 관측소에서 나타났으며, 최소값은 0.39로 길안 관측소에서 나타났다. 종합하면 모든 모델 결과에서 삼문 관측소 또는 합천 관측소에서 가장 큰 BFI 값을 나타냈으며, 최소값은 모든 모델에서 길안 관측소에서 가장 작은 BFI 값을 나타냈다. 또한 모델 별 BFI 산정 결과값이 가장 큰 차이를 나타낸 관측소는 0.31로 구포 관측소였으며, 가장 작은 차이를 나타낸 관측소는 0.06로 삼가 관측소였다 (Fig. 4). 그리고 각 모델의 평균값을 산정한 결과 낙동강 수계의 평균 BFI는 0.56~0.65의 범위로 나타났다.



### 3. 하천유량 변동성과 기저유출 기여도

하천유량 변동성과 기저유출 기여도의 관계를 분석하기 위하여 서로 다른 기저유출 분리 모델을 통해 산정된 BFI와 0~1의 동일한 범위를 가지도록 표준화 시킨 SVI의 상관계수를 산정하였다(Table 6). 상관계수를 산정한 결과 SVI와 BFI는 음의 상관관계를 나타내었다. Fig. 5은 표준화한 SVI와 서로 다른 기저유출 분리 모델을 사용하여 산정한 BFI와의 관

계를 나타낸 것이다. SVI와 모델 별 BFI와의 상관계수를 산정한 결과 두 SVI가 상이한 결과가 나타났다. 변동계수와 모델 별 BFI와의 평균 상관계수는 -0.85로 높은 상관관계를 나타냈다. 반대로 유황계수와 모델 별 BFI와 평균 상관계수는 -0.28로 낮은 상관관계를 나타냈다. 이를 기저유출 분리 모델 별로 살펴보면, PART로부터 산정된 BFI와 변동계수의 상관계수는 -0.81로 높은 상관관계를 나타냈으나 다른 모델과 비

Table 6 Coefficient of correlation between SVI and BFI

SVI	PART	BFLOW	WHAT	Average
CV	-0.81	-0.86	-0.87	-0.85
CFR	-0.20	-0.32	-0.32	-0.28

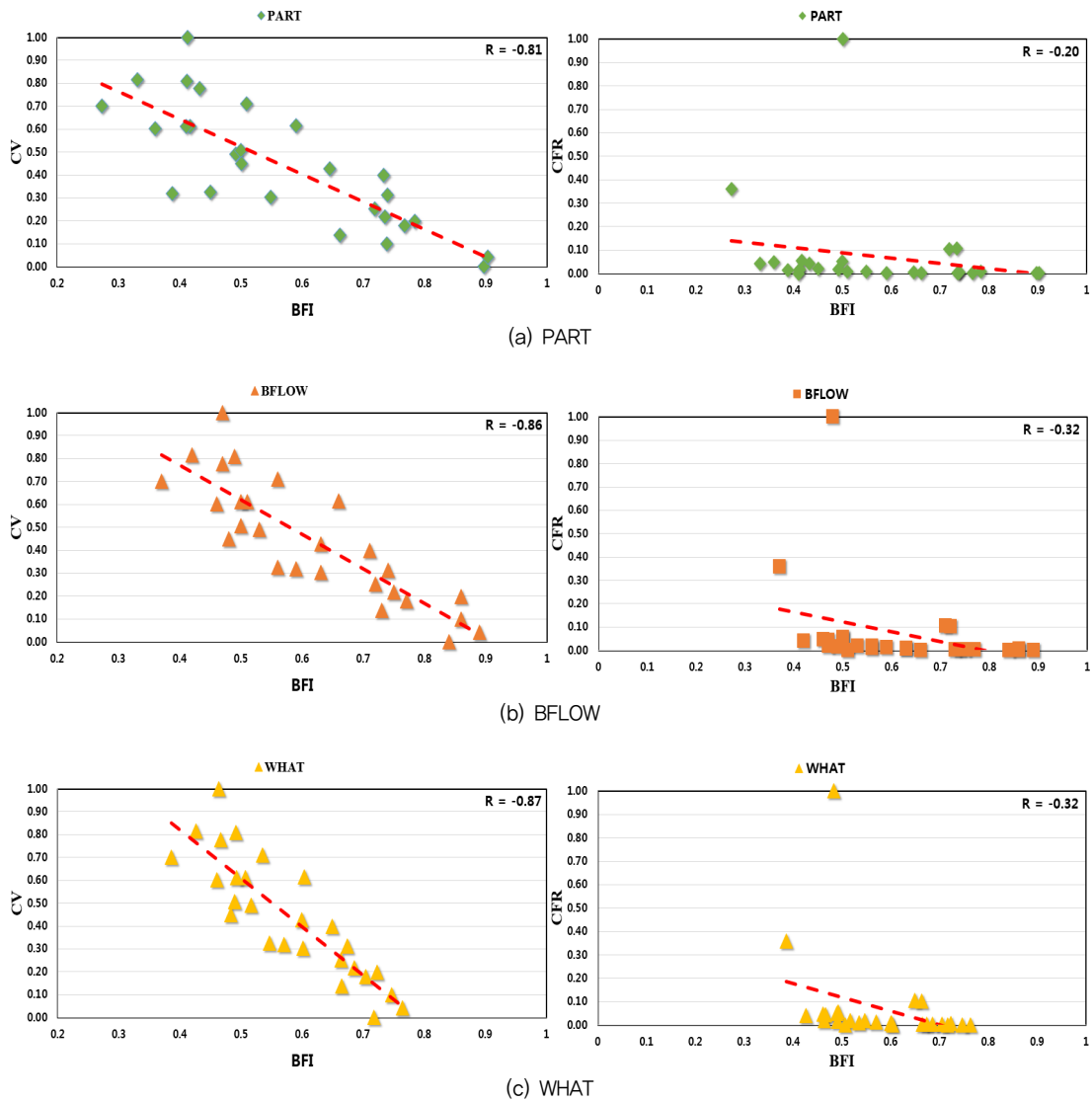


Fig. 5 Standardized SVI and BFI

교하여 가장 낮은 상관계수를 나타냈다. 유황계수와와의 상관계수는 -0.20로 변동계수와 비교하여 매우 낮은 상관관계를 나타냈으며, 다른 모델과 비교했을 때 가장 낮은 상관계수를 나타냈다. 다음으로 BFLOW로부터 산정된 BFI와 변동계수의 상관계수는 -0.86으로 PART 보다 높은 상관계수는 나타냈다. 유황계수와와의 상관계수 산정결과 역시 PART에 비해 높은 상관계수를 나타냈다. 마지막으로 WHAT으로부터 산정된 BFI와 변동계수의 상관계수는 -0.87로 세 가지의 모델 중 가장 높은 값은 나타냈다. 유황계수와와의 상관계수는 BFLOW와 같은 값은 나타냈으며, 세 가지 모델 모두 변동계수와 비교하여 매우 낮은 상관관계를 나타냈다.

BFI에 대하여 유황계수와 변동계수가 서로 상이한 결과도 출현된 이유는 앞서 언급했듯이 두 SVI의 산정 방법 차이에서 유황계수 변동성에 대한 두 SVI의 의미가 다르기 때문인 것으로 판단되었다. 본 연구의 결과로 보아 하천유량 변동성과 기저유출 기여도의 관계를 분석 할 시에는 사용하고자 하는 SVI의 특성을 고려하여 연구 목적에 적합한 SVI를 선정해야 될 것으로 사료되며, 이를 위해 유황계수와 변동계수뿐만 아니라 이 외의 SVI에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구는 낙동강 수계를 대상으로 하천유량 변동성과 기저유출 기여도 관계에 대해서 분석 하였다. 이를 위해 낙동강 수계에 위치한 200개의 유량관측소를 대상으로 2009년부터 2103년까지 5년 동안 연속된 유량 자료를 보유하고 있는 27개의 유량 관측소를 선정하여 하천유량 변동성을 나타내는 2가지의 SVI(유황계수, 변동계수)를 산정하였다. 그리고 다양한 기저유출 분리 모델(WHAT, PART, BFLOW)을 활용하여 27개 유량관측소의 BFI를 산정하였다.

SVI 산정결과 27개 유량관측소 중 경주 관측소의 변동계수는 0.90으로 하천유량 변동성이 가장 크게 나타났으며 삼문 관측소의 변동계수가 0.29로 하천유량 변동성이 가장 작게 나타났다. 이와 다르게 유황계수의 경우 점촌 관측소의 하천유량 변동성이 가장 큰 것으로 나타났으며 선산 관측소의 하천유량 변동성이 가장 작게 나타났다. BFI 산정 결과 낙동강 수계의 평균 BFI는 0.56~0.65의 범위로 나타났다. 각 유량 관측소의 BFI 분석 결과 삼문 관측소와 합천 관측소의 기저유출 기여도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 경주2 관측소와 길안 관측소의 기저유출 기여도가 가장 작은 것으로 나타났다. 또한 기저유출 분리 모델에 따라 BFI 산정 결과에 차이가 발생했으며, 유량관측소에 따라 모델 별 BFI의 차이가 다르

게 나타났다. 그러나 일유량과 유역면적, 하천경사, 토양도, 토지이용도 등 기저유출에 영향을 줄 수 있는 다양한 조건들과도 관계가 있을 것으로 예상되며, 추후 다양한 유역 조건에 대한 분석이 필요하다고 판단된다. 또한, 낙동강 수계 전체 200개의 관측소 가운데 기저유출 분리가 가능한 관측소가 27개에 불과하기 때문에 지속적인 유량 관측자료의 품질관리를 통하여 관측자료의 활용성을 확대할 필요가 있다고 생각된다.

하천유량 변동성과 기저유출 기여도의 관계를 분석한 결과 유황계수와 BFI의 평균 상관계수는 -0.28로 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았으나, 변동계수와 BFI의 평균 상관계수는 -0.85로 BFI가 증가할수록 변동계수는 감소하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 기저유출 기여도가 높은 하천일수록 하천유량의 변동성이 작다고 판단된다. 이는 하천에서 직접유출의 기여도보다 기저유출 기여도가 높은 경우 하천유량의 대부분이 기저유출에 의한 지속적인 유량 확보가 가능하기 때문이며, 반대로 직접유출의 기여도가 높은 하천의 경우 강우 시 변동 폭이 큰 직접유출에 의해 전체 하천유량의 변동 폭도 크게 나타나기 때문이다. 하지만 본 연구의 경우 각 하천에 설치된 수리구조물과 다양한 시설로부터 방류되는 방류수량을 고려하지 않고, 단순히 하천유량을 직접유출과 기저유출로만 분리하였기 때문에 보다 정확한 기저유출과 하천유량 변동성의 관계를 분석하기 위해서는 인위적인 요인의 영향도 함께 고려한 연구가 추후 필요할 것으로 생각된다.

#### 사 사

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)과 한국환경산업기술원 GAIA Project (No: 2014000540003) “한국형 표토 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Arnold, J.G., and P.M. Allen. 1999. Validation of Automated Methods for Estimating Baseflow and Groundwater Recharge From Stream Flow Records. *Journal of American Water Resources Association* 35(2): 411-424.
2. Bae, D. H., W. J. Il, and H. J. Chang, 2007. Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. *Climate Research* 35(3): 213 (in Korean).
3. Brodie, R. S., and S. Hostetler, s2005. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. In *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conference* (28).

4. Deelstra, J., and A. Lital, 2008. The use of the flashiness index as a possible indicator for nutrient loss prediction in agricultural catchments. *Boreal environment research* 13(3): 209-221.
5. Déry, S. J., T. J. Mlynowski, M. A. Hernández-Henríquez, and F. Straneo, 2011. Interannual variability and interdecadal trends in Hudson Bay streamflow. *Journal of Marine Systems* 88(3): 341-351.
6. Dettinger, M. D. and H. F. Diaz, 2000. Global characteristics of stream flow seasonality and variability. *Journal of Hydro-meteorology* 1(4): 289-310.
7. Eckhardt, K. 2008. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology* 352(1): 168-173.
8. Gustard, A., A. Bullock, and J. M. Dixon, 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology.
9. Haddeland, I., J. Heinke, H. Biemans, S. Eisner, M. Flörke, N. Hanasaki and D. Wissler, 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(9): 3251-3256.
10. Hong, J. Y., K. J. Lim, Y. C. Shin, and Y. H. Jung, 2015. Quantifying Contribution of Direct Runoff and Baseflow to Rivers in Han River System, South Korea. *Journal of Korea Water Resource Association* 48(4): 309-319 (in Korean).
11. Kang, S. K., D. R. Lee, J. W. Moon, and S. J. Choi, 2010. Effects of Dams and Water Use on Flow Regime Alteration of the Geum River Basin. *Journal of Korea Water Resource Association* 43(4): 325-336 (in Korean).
12. Kumar, S. and V. Merwade, 2011. Evaluation of NARR and CLM3. 5 outputs for surface water and energy budgets in the Mississippi River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 116(D8).
13. Lee, H. S., K. S. Park, S. H. Jung, and S. K. Choi, 2013. Catchment Similarity Assessment Based on Catchment Characteristics of GIS in Geum River Catchments, Korea. *Journal of the Korean Society for Geo-Spatial Information System* 21(3): 37-46 (in Korean)
14. Lee, J. M., Y. Shin, Y. S. Park, D. Kum, K. J. Lim, S. O. Lee, H. Kim, and Y. Jung, 2014. Estimation and assessment of baseflow at an ungauged watershed according to landuse change. *Journal of Wetlands Research* 16(4): 303-318 (in Korean)
15. Lee, J. W., H. S. Kim, and H. S. Woo, 1993 An Analysis of the Effect of Damming on Flow Duration Characteristics of Five Major Rivers in Korea. *Korean Society of Civil Engineers*, 13(3): 79-91 (in Korean).
16. Lim, K. J., B. A. Engel, Z. Tang, J. Choi, K. S. Kim, S. Muthukrishnan, and D. Tripathy, 2005. Automated web gis based hydrograph analysis tool, WHAT1. *Journal of the American Water Resources Association* 1407-1416.
17. Luo, Y., J. Jia, M. Shao, and L. Lin, 2012. Study on flood control planning and design for Comprehensive Improvement Project of Main-stream of Longganghe River. *Water Resources and Hydropower Engineering* 8: 015.
18. Lyne, V.D. and M. Hollick, 1979. Stochastic Time-Variable RainfallRunoff Modeling. In: *Hydro. and Water Resour. Symp.* Institution of Engineers Australia, Perth, Australia: 89-92.
19. Mason-Deese, W., J. F. Dowd and R. H. Cary, 2013. Comparison of Digital Filter Hydrograph Separation with Geochemical Separation.
20. Nardo, M., M. Saisana, A. Saltelli, and S. Tarantola, 2005. Tools for composite indicators building. European Commission Joint Research Centre. Institute for the Protection and the Security of the Citizen, Econometrics and Statistical Support to Antifraud Unit, I-21020 Ispra (VA) Italy, Report number: EUR, 21682.
21. Park, G., J. Y. Park, H. J. Shin, M. J. Park, and S. J. Kim, 2010. Impact of climate change on paddy water storage during storm periods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(6): 27-37 (in Korean).
22. Rutledge, A. T. 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: Update. US Department of the Interior, US Geological Survey.
23. Sato, K., K. Masuhara, S. Mochida, T. Yamamoto, H. Gotoh, and M. Takezawa, 2012. Flood control in small urban rivers: an example of river projects in Tokyo. *Urban Water*: 122.
24. Schwartz, S. S., B. Smith, and M. McGuire, 2012. Baseflow Signatures of Sustainable Water Resources. Final Report to the Hughes Center for Agroecology, Queenstown, MD.
25. Shin, M. H., J. A. Lee, S. U. Chen, Y. J. Lee, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2010. Analysis of the Characteristics of NPS Runoff and Application of L-THIA model at Upper Daecheong Reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 1-11 (in Korean).
26. Stewart, M., J. Cimino, and M. Ross, 2007. Calibration of base flow separation methods with streamflow conductivity. *Ground-water* 45.1: 17-27.
27. Strauch, A. M., R. A., MacKenzie, C. P. Giardina, and G. L. Bruland, 2015. Climate driven changes to rainfall and streamflow patterns in a model tropical island hydrological system. *Journal of Hydrology* 523: 160-169.
28. Suriya, S. and Mudgal. B. V. 2012. Impact of urbanization on flooding: the Thirusoolam sub watershed-a case study. *Journal of Hydrology* 412: 210-219.
29. Taylor, R. G., B. Scanlon, P. Döll, M. Rodell, R. Van Beek, Y. Wada, and H. Treidel, 2013. Ground water and climate change.

- Nature Climate Change* 3(4): 322-329.
30. Yoon, S. H. and J. H. Lee, 2004. Runoff Characteristics by Urbanization in the Mushim Stream Watershed using HEC-BMS. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(3): 43-54 (in Korean).
31. Zhang, Y., A. H. Arthington, S. E. Bunn, S. Mackay, J. Xia, and M. Kennard, 2012. Classification of flow regimes for environmental flow assessment in regulated rivers: the Huai River Basin, China. *River Research and Applications* 28(7): 989-1005.