

## 한강수계의 하천에 대한 직접유출과 기저유출의 기여도 정량화 Quantifying Contribution of Direct Runoff and Baseflow to Rivers in Han River System, South Korea

홍 지 영\* / 임 경 재\*\* / 신 용 철\*\*\* / 정 영 훈\*\*\*\*

Hong, Jiyeong / Lim, Kyoung Jae / Shin, Yongchul / Jung, Younghun

### Abstract

River characteristics in South Korea has been affected by seasonal climatic variability due to climate change and by remarkable land cover change due to rapid economic growth. In this regard, the roles of river management is getting more important to eco-system and human community in watersheds of South Korea. Understanding river characteristics including direct runoff and baseflow, the first step of river management, can give a significant contribution to sustainable river environment. Therefore, the objective of this study is to quantify the contributions of the direct runoff and baseflow to river streamflow. For this, we used the BFLOW and WHAT programs to conduct baseflow separation for 71 streamflow gauge stations in Han River system, South Korea. The results showed that baseflow index for 71 stations ranges from 0.42 to 0.78. Also, gauge stations which have baseflow index more than 0.5 occupied 76% of a total stations. However, baseflow index can be overestimated due to human impacts such as discharge from dams, reservoirs, and lakes. This study will be used as fundamental information to understand river characteristics in river management at the national level.

**Keywords** : baseflow, direct runoff, BFLOW, WHAT, baseflow index

### 요 지

국내 하천특성은 기후변화에 의한 계절별 기후변동성과 급속한 경제성장으로 인한 급격한 토지피복의 변화에 의하여 영향을 받아왔다. 이와 관련하여, 하천관리는 수자원이용 등 인간의 활동 뿐 아니라 생태계측면에서도 그 중요성이 커지고 있다. 하천관리의 첫 번째 단계인 직접유출과 기저유출을 포함한 하천특성을 이해하는 것은 지속적인 하천환경을 조성하기 위하여 지대한 기여를 할 수 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 효율적인 하천관리를 위해 직접유출과 기저유출을 정량화하여 하천에 미치는 기여도를 산정하는 것이다. 이를 위하여 한강수계에 위치한 71개의 유량관측소에 대하여 BFLOW와 WHAT 프로그램을 이용하여 기저유출 분리를 수행하였다. 그 결과 한강수계의 기저유출비는 0.42에서 0.78의 범위를 가지며, 기저유출비가 50%를 넘는 관측소는 전체 관측소의 76%를 차지하였다. 그러나 산출된 기저유출비는 댐, 저수지, 호수로부터의 방류량과 같은 인위적 영향 때문에 과다산정 되었을 가능성이 있다. 본 연구는 추후 국가적 차원에서 하천관리의 효율성과 안전성을 개선하기 위하여 전략적으로 하천 기능을 조절하는데 기여를 할 것으로 기대한다.

**핵심용어** : 기저유출, 직접유출, BFLOW, WHAT, 기저유출비

\* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과 학부과정 (e-mail: jiyeong.hong.1@gmail.com)  
Dept. of Regional Infrastructure Engrg., Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

\*\* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과 교수 (e-mail: kjlim@kangwon.ac.kr)  
Dept. of Regional Infrastructure Engrg., Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

\*\*\* APEC 기후센터 기후변화연구팀 선임연구원 (e-mail: ycshin@apcc21.org)  
Climate change Research Team, APEC Climate Center, Busan 612-020, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 강원대학교 환경연구소 선임연구원 (e-mail: yjung@kangwon.ac.kr, Tel: 82-33-241-6468)

*Corresponding Author*, Institute of Environmental Research, Kangwon National University Chuncheon 200-701, Korea

## 1. 서론

하천환경은 유역특성에 영향을 주는 자연적/인위적 요소에 의하여 결정된다(Jeon et al., 2012). 기후변화와 도시화는 수문순환에 영향을 주면서 각 수문요소들에 영향을 준다. 이러한 영향은 하천의 변동성을 증가시키고 연쇄적으로 인간의 활동 및 하천생태환경을 유지하는데 있어 불안정적인 요소로 작용한다. 하천의 변동성은 하천의 기능을 저하시키고 이수와 치수의 측면에서 이용 가능한 수자원의 감소, 홍수위험의 증가, 하천 건천화 등의 형태로 현실화 되고 있다(Kang, 2011). 따라서 하천의 특성을 파악하여 하천의 변동성을 줄일 수 있는 대안을 찾는 것이 중요하다.

하천관리에 있어 하천유량은 하천특성을 분석하는데 있어 가장 기본적인 자료이다. 이러한 이유로 많은 국가와 기관에서 관측소를 세워 주기적으로 유량을 측정하고 있다. 국내에서도 마찬가지로 여러 기관에서 유량을 측정하고 있으며 최근에는 보다 정확한 하천특성을 파악하기 위하여 자동 측정 장치 도입 및 자료품질관리 등 지속적인 노력을 하고 있다. 하천유량은 크게 직접유출과 기저유출에 의해 구성되며, 하천에서 직접유출과 기저유출의 역할 및 기능은 다르다. 따라서 직접유출과 기저유출로 구분하여 하천특성을 파악하는 것이 필요하다.

직접유출은 강우사상 발생 시 단시간에 많은 양의 하천수를 공급하기 때문에 홍수위험을 높일 수 있는 가장 큰 요소들 가운데 하나이다. 따라서 직접유출이 하천에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 반면 기저유출은 지하수와 지표하유출로 구성되고 하천을 지속적으로 유지하는데 있어 중요한 역할을 한다. 갈수기의 하천은 강우의 영향이 적기 때문에 주로 기저유출에 큰 의존도가 있다. 따라서 갈수기의 하천의 기능은 기저유출의 수량과 수질에 따라 큰 영향을 받는다. 특히 국내의 기후는 몬순기후에 큰 영향을 받기 때문에 하천은 계절의 특성에 따라 변동성을 가지며, 우기가 아닌 건기에 기저유출의 중요성이 더 부각될 수 있다. 그러나 기저유출은 직접유출과 달리 그 측정이 어렵기 때문에 상대적으로 연구가 미미하게 이루어져 왔다(Cho, 2006). 이러한 이유로 직접유출과는 달리 기저유출에 대한 국가적 주목을 덜 받아왔다. 그러나 갈수기의 하천유량과 밀접한 관련이 있는 기저유출의 감소는 어류의 서식지 감소와 더불어 수질의 악화와 같은 직접적이고 부정적인 영향을 하천에 전달하기 때문에 하천의 생태적 환경적 역할을 저하시킬 수 있다. 이에 따라 기저유출에 대한 연구는 홍수기에 대한 연

구만큼 중요한 문제로 대두되고 있다.

기저유출 분리 방법으로는 일반적으로 수평직선분리법, N-day법 등이 이용되어 왔으나 이는 장기유출에 대한 적용성이 효율적이지 못하다는 단점이 있다. 이러한 이유로 RECESS (Anderson and Burt, 1980), RORA (Rutledge, 1998), WHAT (Lim et al., 2005), BFLOW (Arnold and Allen, 1999) 등은 장기유출에 대한 기저유출 특성을 파악하는데 사용되어 왔다. Kum et al. (2011)은 Web 기반 BFLOW를 이용하여 4대강 유역의 기저유출을 분석하였으며, 그 결과 약 50%의 하천이 23.4~68.6%의 기저유출비를 나타냄을 밝혀냈다. 또한 Kang et al. (2012)은 BFLOW 프로그램을 이용하여 산정한 장기간 유량 특성 시의 Alpha Factor를 SWAT 모형에 적용하여 그 차이를 분석하였다. 기후변화와 토지이용으로 인한 홍수에 대한 연구에서도 기저유출을 나누기 위하여 BFLOW를 이용하였으며(Du, 2012), 또 다른 연구(Kedareswarudu, 2013)에서는 작은 개울이 계곡을 이룰 때 기저유출이 미치는 영향을 고려하기 위하여 BFLOW를 이용하였다. 또한 Web-based hydrograph analysis tool (WHAT)을 이용하여 Ji (2011)는 한강 유역의 기저유출과 지하수위와의 상관관계를 분석하였으며, 지하홍수발생에 대한 해석을 위해 건기와 우기 시의 기저유출량을 비교하는 연구에서도(Nam et al., 2013) WHAT이 이용되었다. 국외의 연구에서도 WHAT으로 기저유출을 분리하여 Perennial Stream 수계를 평가하였다(Anurag, 2010). 이와 같이 BFLOW와 WHAT은 국내/국외의 기저유출분리에서 대표적으로 사용되는 방법들이다.

기저유출 특성에 대한 분석은 대부분 지역적으로 수행되어 왔기 때문에 국내 및 국외에서 통합유역관리에서 기저유출의 중요성은 저감되어 왔다. 하지만 기저유출 또한 직접유출만큼 환경과 생태에 큰 영향을 미치므로 이에 따라 기저유출특성을 파악하여 수량과 수질에 변동성에 의한 인간사회와 생태환경에 부정적 영향을 최소화 하여야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 한강수계의 하천에 대한 직접유출 및 기저유출을 산정하여 하천에 미치는 기여도를 정량화하는 것이다. 이를 위하여 한강수계에 포함되어 있는 모든 유량관측소를 조사하여 이용 가능한 하천 유량 자료에 BFLOW와 WHAT을 적용하여 기저유출비를 산정하였다. 본 연구의 결과는 추후 국가 차원에서 저유량 및 갈수량에 대하여 직접유출과 기저유출의 기여도에 따라 하천관리의 우선순위를 결정할 수 있는 지표가 될 뿐만 아니라 홍수기와 갈수기에 하천에 미치는 도시화 및 기후변화의 위험성을 산정하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 대상지역

국내 지형적 특성은 동고서저의 형상을 띄며, 국토면적의 70% 이상이 산지로 이루어져있다. 우리나라 수계 구성은 크게 한강 수계, 낙동강 수계, 금강 수계, 영산강/섬진강 수계로 나뉘어 관리되고 있으며, 그 중 본 연구의 대상인 한강 수계의 면적은 41,956.97 km<sup>2</sup>로 가장 큰 부분을 차지한다. 한강 수계의 평균 연 기온은 10.5°C이며 몬순기후의 영향으로 우기에 대부분의 강수가 집중되며 이로 인하여 계절별 특성이 뚜렷하다. 이러한 계절별 특성은 하천의 변동성을 증가시키기 때문에 기저유출의 역할을 매우 중요하다. 그러나 기저유출 관측 자료가 부재하기 때문에 본 연구에서는 한강 수계에서의 기저유출을 관측 유량으로부터 기저 유출 분리법에 의하여 분리하고자 하였다. 이에 대해 기저유출 특성을 파악하기 위해서 한강수계에 포함되어 있는 유량관측소를 조사하였다. 국내 유량관측소는 수자원공사, 한국농어촌공사, 국토해양부에서 주관하고 있으며, 유속계, 봉부자, 회전형, 초음파 등을 이용하여 유량자료를 관측한다. 이러한 유량자료는 국토교통부에서 관리하는 웹기반의 국가수자원관리 종합정보시스템(Water management information system, WAMIS)에서 쉽게 조사 및 수집할 수 있다. WAMIS에 포함되어 있는 전국 유량관측소는 총 632개 이지만, 현재 운용중인 관측소는 400개 이다. 본 연구의 대상지역인 한강 수계에서 운용중인 관측소는 106개 이다. 그러나 운용 중에 있는 관측소에서 보유하고 있는 자료의 형태 및 기간이 모두 다르기 때문에 본 연구에서는 최근 2009년부터 2013년까지 일유량 자료가 있는 한강 수계의 71개 관측소를 조사하였다. 최근 5년(2009~2013)의 일유량 자료가 이용 가능한 모든 지점에 대하여 BFLOW와 WHAT을 적용하여 기저유출을 분리하였다. Fig. 1은 본 연구를 위한 한강수계에 포함된 최근 5년의 연속된 일유량 자료를 보유한 유량관측소의 공간적 위치를 나타낸다.

## 3. 연구방법

본 연구에서는 연속된 유량자료로 기저유출비를 산정하기 때문에 기저유출분리를 수행하기 위하여 BFLOW와 WHAT을 선택하였다. 또한, 기저유출의 관측 자료가 부재하기 때문에 일관성 있는 기저유출을 분리하기 위하여 최근 5년간 하천 일유량을 보유하고 있는 유량관측소로부터 얻은 관측된 하천 유량에 BFLOW와 WHAT을 적용하여 비교하였다. 또한 평균 연 유량을 기저유출비에 적용

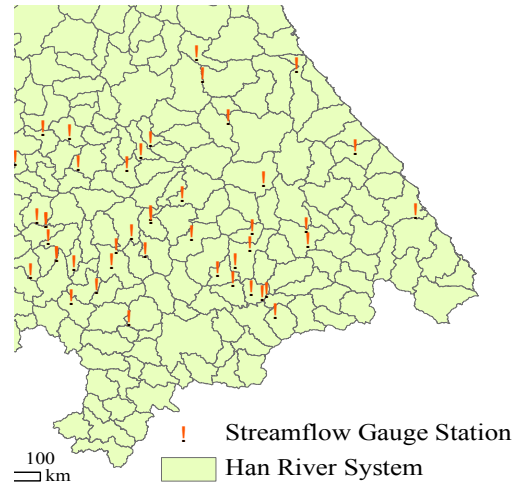


Fig. 1. Streamflow Gauge Station

하여 평균 연 직접유출량과 기저유출량을 정량화 하였다. 본 연구에서 산정된 평균 연 유량, 직접유출량, 기저유출량, 기저유출비, 직접유출비는 국가단위의 유량특성을 조사하는데 활용될 수 있다고 예상된다.

### 3.1 BFLOW을 이용한 기저유출 분리

BFLOW (Baseflow filter program)는 기저유출분리를 위해 가장 많이 사용되어온 방법들 가운데 하나이다 (Willems, 2009; Ahlblame et al., 2013). BFLOW는 앞에서 언급한 Digital filtering (Eqs. (1) and (2))을 이용하여 유량으로부터 기저유출을 분리하며, 전체 유량에 대한 기저유출비를 결과물로서 제공한다. 기저유출을 구하기 위해 Lyne and Hollick (1979)이 Digital filtering 방식을 이용하여 하천유량자료를 직접유출과 기저유출로 분리하는데 사용되었다. Digital filtering은 원래 신호 처리(Signal Processing) 분야에서 고주파와 저주파를 분리하는 데 사용되었다. 하천유출에서 기저유출을 분리하는 것은 고주파 신호를 분리하는 방법으로부터 응용되었다. 이에 따라 Digital filter 방법은 직접유출과 기저유출의 물리적 특성을 고려하지 않았지만 빠른 계산이 가능하고 일관성이 있는 재현이 가능하다(Arnold et al., 1995). Digital filter를 이용하여 기저유출을 분리하는 Eqs. (1) and (2)는 다음과 같다.

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

여기서,  $q_t$ =t시간에 분리된 직접유출량( $m^3/s$ )  
 $b_t$ =t시간에 분리된 기저유출량( $m^3/s$ )

$\beta$ =필터 매개상수

$Q_t$ =t시간에 전체 하천유출량( $m^3/s$ )

$Q_{t-1}$ =t-1시간에 전체 하천유출량( $m^3/s$ )

일반적으로 BFLOW 프로그램은 Pass1, Pass2, Pass3 (i.e. forward, backward, and forward)을 선택하여 하천 유량자료에 대한 filter의 통과량으로 기저유출을 계산할 수 있다. 각 Pass는 하천유량의 비로써 기저유출의 감소 시키며, Arnold et al. (1995)은 세 Pass에 대하여 산정된 기저유출량 산정을 수행하여 Pass1, Pass2, Pass3에 의하여 산정된 기저유출 가운데 Pass3가 가장 크게 감소시킨 것을 보여주었다. Pass의 선택은 각 유역의 특성에 따라 다르게 선택할 수 있지만 국내의 경우 기저유출에 대한 관측이 거의 수행되지 않아 이를 결정할 명백한 기준이나 대상이 충분하지 않다. 국외의 경우 Arnold and Allen (1999)은 미국 메릴랜드, 버지니아, 조지아, 펜실베이니아주의 11개 유역에 대하여 Pass1에 의해 산정된 연 기저유출이 다른 방법들에 의해 산정된 값과 비교했을 때 약  $\pm 11\%$  내에서 일치성을 보였다. 이와 관련하여 Ahlblade et al. (2013)은 미국 인디애나주의 미계측유역의 기저유출량을 산정하기 위한 회귀식을 구축하기 위하여 관측 자료로 사용할 기저유출을 관측 유량에 BFLOW의 Pass1에 의하여 산정하였다.

### 3.2 WHAT을 이용한 기저유출 분리

웹기반으로 개발된 WHAT은 USGS의 유량자료 데이터 베이스와 직접 연결되어 기저유출 분리의 접근성 및 이용성을 확대하였다. 뿐만 아니라 사용자의 자료를 웹에서 쉽게 업로드하여 기저유출을 분리할 수 있다. WHAT은 미국 퍼듀대학교의 웹사이트(<https://engineering.purdue.edu/~what/>)에서 이용할 수 있고, 그 인터페이스는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 WAHT 시스템의 모듈가운데 유역내 대수층의 특성을 고려한 Eckhardt Filter 방법(Eckhardt, 2005)을 이용하여 기저유출 분리하였다(Eq. (3)).

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha + b_{t-1} + BFI_{max} Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (3)$$

여기서,  $b_t$  = t시간에 분리된 기저유출량 ( $m^3/s$ )

$b_{t-1}$  = t-1시간에 분리된 기저유출량 ( $m^3/s$ )

$\alpha$  = 필터 매개상수

$Q_t$  = t시간에 전체 하천유출량 ( $m^3/s$ )

$BFI_{max}$  = 오랜 기간동안의 총 하천유출량과 기저유출량의 비의 최대값

그러나 Eckhardt Filter 식의 변수인  $BFI_{max}$ 은 주관적

인 요소로 작용하여 기저유출 분리결과에 영향을 줄 수 있다. 따라서 정확한 수문분석을 위해서는 연구대상 유역내 대수층의 특성에 가장 부합되는 BFI 변수값을 구하여야한다. 이러한 주관적인 요소를 최소화하기 위해 Eckhardt (2005)는 대표적 대수층 별로  $BFI_{max}$  값을 제안하였다. 제안된  $BFI_{max}$ 은 항류하천(perennial streams)의 대수층(porous aquifer)에서 0.8, 일시하천(ephemeral streams)의 대수층에서 0.5, 항류하천의 화강암지대(hard rock aquifer)에서 0.25이다. 적절한  $BFI_{max}$ 를 결정하기 위해서 본 연구에서는 한강 유역의 토양도를 분석하였다. 본 연구에서는 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000의 한강유역의 토양도를 미국 농무성 토양보존국에서 사용하고 있는 NRCS 토양분류 방법을 이용해 크게 A, B, C, D의 토양군으로 구분하였다(Fig. 3). 한강 유역은 투수율이 좋은 A군과 B군이 총 유역의 91%를 점유하고 있기 때문에 배수가 양호한 편이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용된 Eckhardt Filter 식의 변수인  $BFI_{max}$  값은 항류하천의 대수층으로 선택하여 0.8의 값을 적용하였다.

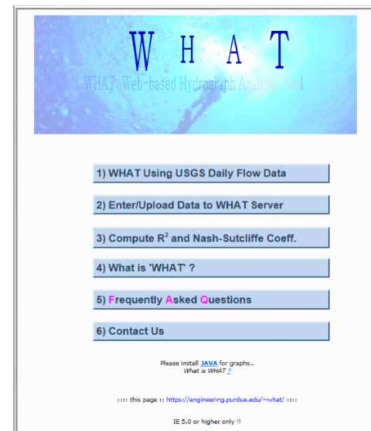


Fig. 2. Web Interface of WHAT

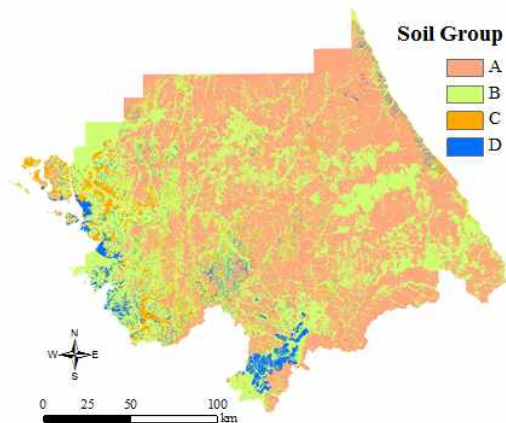


Fig. 3. NRCS Soil Groups in Han River system

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 한강수계의 하천유량 분석

BFLOW와 WHAT을 적용하여 기저유출을 분리하기 위해서는 연속된 일유량 자료가 필요하기 때문에 한강수계에서 운용중인 유량관측소를 조사하여 2009년부터 2013년까지 최근 5년에 대하여 연속된 일 유량 자료를 보유하고 있는 관측소를 조사하였다. 조사결과 최근 5년의 일 유량의 연속된 관측 자료를 보유하고 있는 관측소는 71개로 파악되었다. 이에 따라 본 연구에서는 한강수계의 현재 운용중인 71개의 유량관측소에 대하여 한강의 특성을 파악하고자 평균 연 유출량, 기저유출비, 직접 유출, 기저유출을 정량화 하였다. Fig. 4는 71개의 한강 유량관측소로부터 수집된 5년의 하천유량에 대하여 평균 연 유량으로 환산하여 공간적으로 도식한 결과를 보여준다. 최근 5년 동안 한강수계에서 평균 연 유량은 33.76 km<sup>3</sup>/year으로 행주대교에서 가장 크게 관측되었고 0.05 km<sup>3</sup>/year로 우이관측소에서 가장 낮게 관측되었으며 행주대교는 서울특별시 강서구 개화동, 우이관측소는 서울특별시 노원구 월계제1동에 위치하고 있다. 가장 큰 유량은 국가하천인 한강본류의 관측소에서 관측되었으며 평균 연 최고유량과 최저유량의 차이는 33.71 km<sup>3</sup>/year로 나타났다. 하천유량의 크기는 배수면적과 밀접한 관계를 가지고 있으나,

추후 하천유량이 정량적으로 낮은 지점들에 대하여 기후, 물소비, 인구, 산업구조 등을 고려한 수자원 이용성에 대한 하천유량의 건정성 평가가 요구된다.

### 4.2 BFLOW와 WHAT을 이용한 기저유출비 산정 및 비교

본 연구에서는 하천의 특성 중 하천유량에 미치는 기저유출의 영향을 정량화하기 위해 BFLOW와 WHAT을 적용하여 하천 유량에 대한 기저유출비(baseflow index)를 산정하였다. Fig. 5는 한강 수계의 71개 관측소의 최근 5

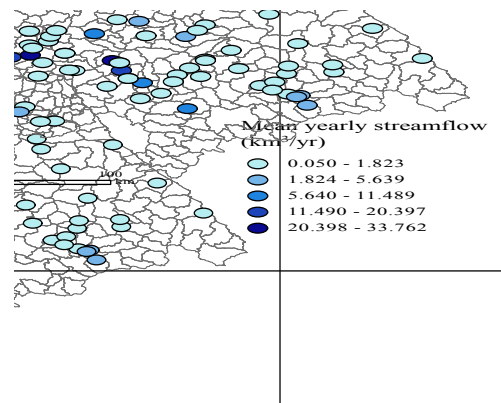
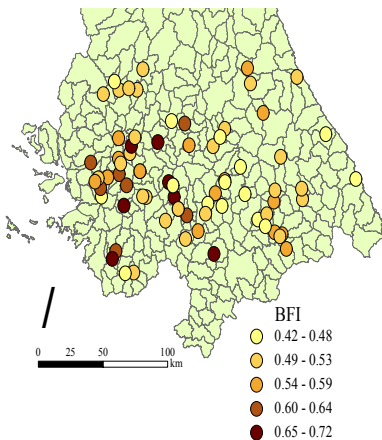


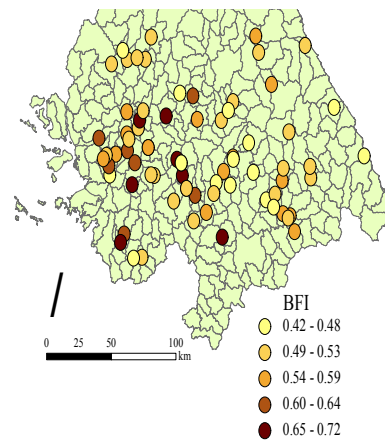
Fig. 4. Spatial Distribution of Annual Mean Streamflow

Table 1. Mean Yearly Streamflow Status

	Highest Flow		Lowest Flow	
	Gauge Station	Mean Yearly Streamflow (km <sup>3</sup> /year)	Gauge Station	Mean Yearly Streamflow (km <sup>3</sup> /year)
Hangang	Haengjudaekyo	33.76	Wooui	0.05



(a) BFI from BFLOW



(b) BFI from WHAT

Fig. 5. Spatial Distribution of Baseflow index

년간 하천유량에 BFLOW와 WHAT를 적용하여 산정된 기저유출비를 공간적인 분포로 보여준다. 산정된 기저유출비는 BFLOW의 경우 0.42~0.78의 범위를 나타내며 (Fig. 5(a)), WHAT의 경우 0.42~0.70의 범위를 나타내는 (Fig. 5(b)) 것으로 나타났다. BFLOW와 WHAT을 이용하여 산정된 기저유출비의 최대값과 최소값은 같은 지점에서 산정되었고, 경기도 여주군 금사면 이포관측소에서 최대값을 보였으며 안양시 만안구 박달동에 위치한 안양관측소에서 최소값을 보였다. 대체로 BFLOW로부터 산

정된 기저유출비의 값이 WHAT으로부터 산정된 기저유출비보다 다소 크게 산정되었으나 그 차이는 상당히 미비하였다(Fig. 6). 그러나 기저유출비가 커질수록 BFLOW와 WHAT의 결과값은 더욱 커지는 경향을 보였다. 예를 들어 기저유출비의 최소값을 가지는 안양 유량관측소에서 BFLOW와 WHAT을 이용하여 산정된 기저유출비는 각각 0.420과 0.419로 비슷하였지만, 최대값을 가지는 이포 유량관측소에서는 두 방법사이에 약 10%의 기저유출비 차이를 보였다. Table 2는 한강수계의 71개의 관측소

**Table 2. Average Baseflow Index**

Gauge Station	WHAT	BFLOW	Average	Gauge Station	WHAT	BFLOW	Average
Gapyeong	0.45	0.44	0.44	Yeongwol	0.54	0.55	0.55
Ganhyeon	0.47	0.47	0.47	Yeongwol1	0.58	0.59	0.58
Gangreung	0.44	0.44	0.44	Yeongjung	0.52	0.53	0.53
Gangchon	0.61	0.64	0.63	Yeongchun	0.56	0.58	0.57
Kyeonggan	0.50	0.51	0.51	Wangseongdong	0.56	0.57	0.56
Gososeong	0.49	0.48	0.48	Wooui	0.54	0.57	0.56
Gongdo	0.51	0.52	0.52	Wonju	0.48	0.48	0.48
Gwanin	0.52	0.53	0.53	Wontong	0.56	0.57	0.57
Gunnam	0.46	0.46	0.46	Yulguk	0.51	0.51	0.51
Gulun	0.47	0.46	0.46	Imokjeong	0.53	0.53	0.53
Gungnae	0.68	0.73	0.70	Ipo	0.70	0.78	0.74
Najeon	0.52	0.52	0.52	Janghyeon	0.55	0.56	0.55
Naegok	0.67	0.74	0.71	Janghowon	0.52	0.52	0.52
Naerincheon	0.49	0.49	0.49	Jeokseong	0.49	0.5	0.50
Dopyeong	0.51	0.52	0.51	Jeongok	0.52	0.52	0.52
Maeil	0.47	0.47	0.47	Jeoncheon	0.46	0.46	0.46
Mokkye	0.67	0.73	0.70	Jeongseon2	0.51	0.51	0.51
Munmak	0.51	0.52	0.52	Jucheon	0.47	0.47	0.47
Bangrimgyo	0.52	0.52	0.52	Junranggyo	0.53	0.53	0.53
Beopcheon	0.56	0.58	0.57	Cheonwang	0.56	0.58	0.57
Bokhakyo	0.49	0.51	0.50	Cheongmi	0.53	0.53	0.53
Bupyeong	0.52	0.52	0.52	Cheongpyeong	0.69	0.74	0.72
Bukpyeong	0.47	0.47	0.47	Toigyewon	0.49	0.49	0.49
Samcheok	0.59	0.61	0.60	Panwun	0.53	0.54	0.53
Seomyeon	0.54	0.56	0.55	Palgoi	0.52	0.52	0.52
Seongnam	0.63	0.66	0.64	Paldangdaekyo	0.62	0.64	0.63
Siheung	0.63	0.67	0.65	Pyeongchang	0.57	0.58	0.58
Singok	0.56	0.57	0.57	Hangangdaekyo	0.58	0.58	0.58
Sinjeong	0.52	0.53	0.53	Haengjudaekyo	0.62	0.61	0.62
Sincheon	0.44	0.44	0.44	Hongcheon	0.53	0.57	0.55
Anyang	0.42	0.42	0.42	Hwachon	0.49	0.49	0.49
Anheung	0.48	0.48	0.48	Hoihwa	0.62	0.66	0.64
Yangryeong	0.48	0.48	0.48	Hoingseong	0.55	0.57	0.56
Yangyang	0.51	0.51	0.51	Hukcheonkyo	0.48	0.48	0.48
Yeoju	0.64	0.68	0.66	Heungcheon	0.63	0.7	0.66
Yeongdongdaekyo	0.64	0.67	0.65	-	-	-	-



에 대하여 BFLOW와 WHAT을 이용하여 산정된 기저유출비를 보여준다. 특히, BFLOW로 산정된 한강수계의 기저유출 산정 결과는 Ahlblame et al. (2013)이 BFLOW를 이용하여 산정한 미국 인디애나주 22개 지점에서의 기저유출비(0.61)와 비교했을 때 평균 기저유출비가 0.55로

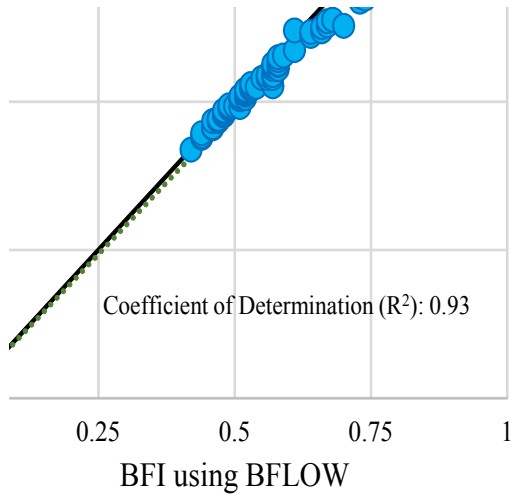
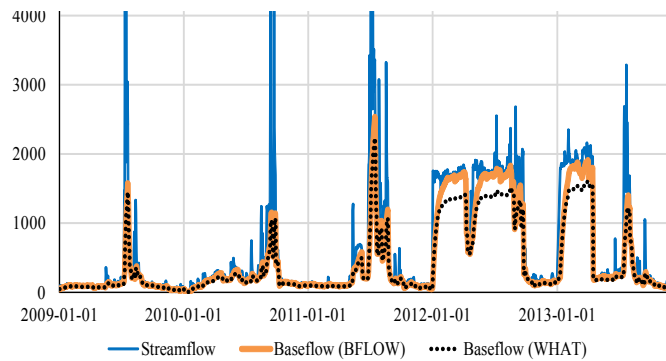


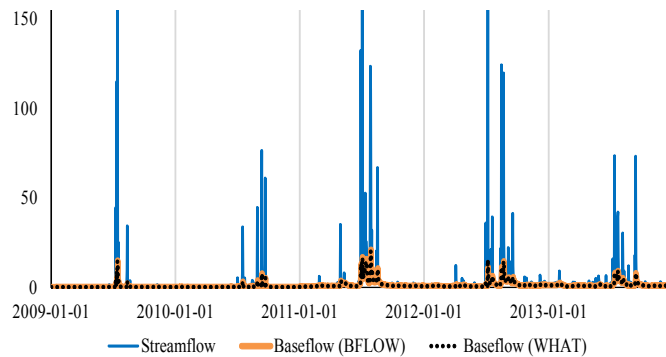
Fig. 6. Difference of BFIs Estimated from BFLOW and WHAT

낮은 경향을 보였다. 한강 수계내의 많은 수리구조물의 영향을 고려하더라도 미국 인디애나 주의 기저유출의 영향보다 작다. 이는 한강수계가 대부분 산지로 이루어져 있는 반면 인디애나 주는 평지로 이루어져 있어 추후 기저유출에 미치는 지형적 영향을 분석할 필요가 있다.

Fig. 7(a)는 기저유출비가 최대인 이포 유량관측소에서 BFLOW와 WHAT을 이용한 기저유출을 분리한 결과를 비교하여 보여주며, Fig. 7(b)는 기저유출비가 최소인 안양관측소에서 두 방법을 이용한 기저유출을 분리하여 비교한 결과를 보여준다. Figs. 7(a) and 7(b)에서 두 방법을 이용한 기저유출 분리에서는 매우 비슷한 결과를 보여 준 반면, 최대/최소 기저유출비를 가지는 유량관측소 사이에서는 기저유출의 기여가 확연히 다른 것으로 나타났다. 여기서 한강 수계 중 최대 기저유출비를 갖는 이포 관측소는 2009년부터 2013년까지 1826개의 일 유량자료에 대하여 평균 일유량은  $607.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 평균편차는  $766.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 또한, 평균값에 대한 표준편차의 비를 나타내는 변동계수(coefficient of variation, CV)를 계산하여 일유량의 변동성을 정량화하여 기저유출비와 변동계수를 비교하였다. 기저유출비가 가장 높은 이포 관측소의 변동계수는 1.26으로 산정되었다. 반면 기저유출비



(a) Ipo gauge station



(b) Anyang gauge station

Fig. 7. Baseflow Separation using BFLOW and WHAT

의 최소값을 갖는 안양 관측소의 경우, 평균 일 하천유량은  $2.6\text{m}^3/\text{s}$ , 표준편차는  $11.4\text{m}^3/\text{s}$ 로 하천의 변동계수는 4.34로 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 안양관측소의 하천 변동계수가 이포관측소의 약 3.4배 정도 더 큰 점을 고려했을 때 변동계수가 클수록 기저유출비는 작아질 수 있다는 것을 예상할 수 있다. 이와 관련하여 변동계수가 클수록 강우사상과 같은 기후적 영향이나 취수와 같은 인위적 영향에 따라 하천의 변동성이 증가하여 기저유출비가 작아질 가능성이 높다. 특히, 몬순기후에 의하여 계절별 특성이 뚜렷한 국내 하천환경에서 건기(dry season)에 기후

적/인위적 영향이 더 작용한다면 하천에서 기저유출비는 더욱 감소할 것으로 판단된다.

Figs. 8 and 9는 본 연구에서 산정한 국내 하천에 대한 기저유출비(Fig. 5)를 이용하여 직접유출량(Figs. 8(a) and 8(b))과 기저유출량(Figs. 9(a) and 9(b))을 구분하여 산정한 결과를 공간적으로 보여준다. 직접유출량의 경우(Fig. 8) BFLOW와 WHAT으로 산정한 결과 모두 위치한 행정대교 관측소에서 최대 평균 연 직접유출량을 가졌다. BFLOW로 산정한 직접유출량은  $13.17\text{km}^3/\text{year}$ 로, WHAT으로 산정한  $12.83\text{km}^3/\text{year}$  보다  $0.34\text{km}^3/\text{year}$  큰 값을 갖는 것

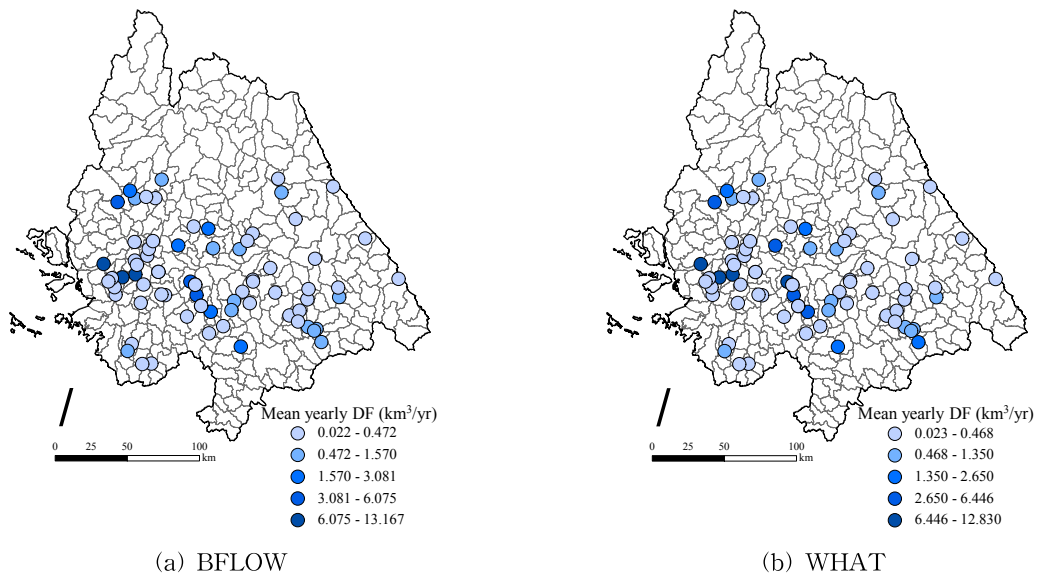


Fig. 8. Spatial Distribution of Direct Runoff

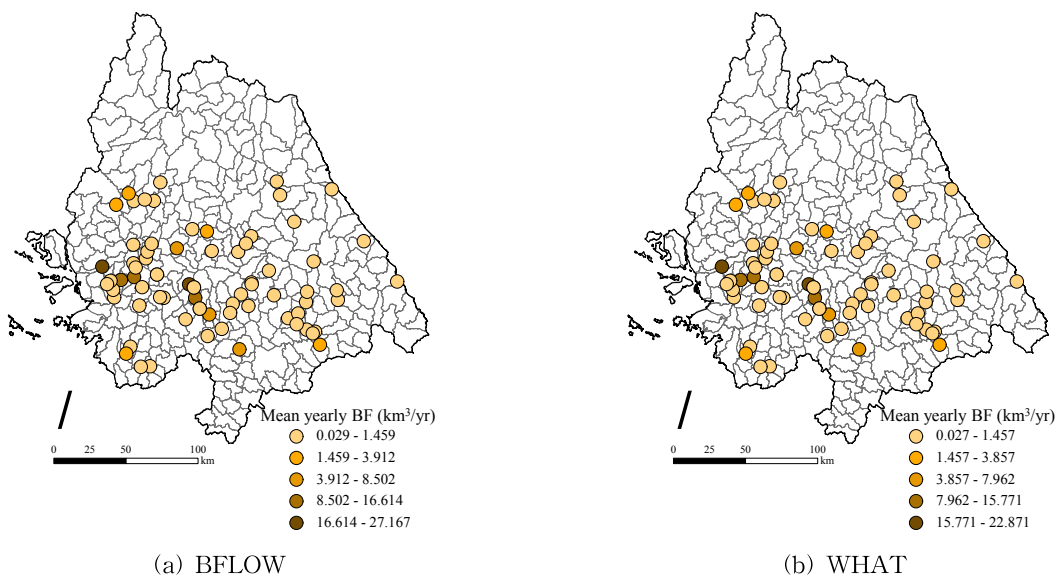


Fig. 9. Spatial Distribution of Baseflow



으로 나타났다. 최저 평균 연 직접유출량은 BFLOW와 WHAT을 이용한 결과 모두 우이 관측소에서 산정되었다. BFLOW를 이용하여 산정한 직접유출량은  $0.022 \text{ km}^3/\text{year}$ , WHAT을 이용하여 산정한 직접유출량은  $0.023 \text{ km}^3/\text{year}$ 로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 이러한 직접유출과 기저유출의 유사한 정량적 결과는 기저유출비와는 달리 유역면적의 크기에 따른 유량에 비례하기 때문에 평균 연 하천유량(Fig. 4 and Table 1)이 행주대교관측소와 우이 관측소에서 모두 최대/최소값을 갖는 같은 결과를 보인다. 또한, 이러한 정량적 분석은 지속가능한 하천유지의 목적으로 하천정비와 수자원확보를 위한 하천관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 하천특성상 기저유출이 하천에 기여하는 비율이 50%가 넘는 관측소는 총 71개 관측소 중 54개인 76%로 조사되었다. 특히 한강수계에서 이포관측소, 청평관측소, 내곡관측소, 궁내관측소, 목계관측소, 홍천관측소 순으로 기저유출비가 높은 상위 5개 관측소로 나타났다. 그러나 국내의 기저유출비가 높은 지역은 자연적인 기저유출에 의한 영향이 아니라 인위적인 댐이나 저수지의 방류량 혹은 보의 영향으로 기저유출비가 높아진 지역이 많다. 예를 들어 이포관측소는 4대강사업으로 이포관측소 하류에 건설된 이포보의 영향으로 기저유출비가 높게 산정된 것으로 판단된다(Fig. 10(a)). 또한, 북한강 본류에 위치한 청평관측소는 상류에 건설된 청평댐의 방류량에 의해 기저유출이 영향을 받는 것으로 보인다(Fig. 10(b)). 이와 같이 국내의 하천은 인위적 요소에 의한 영향 때문

에 기저유출분리라는 정의보다 직접유출분리로 인하여 직접유출과 직접유출이 아닌 유량(기저유출 + 인위적 요소)로 구분할 필요성이 강조된다.

## 5. 결론

본 연구는 한강수계 하천 특성을 평가하기 위하여 최근 5년 동안의 하천유량 자료가 이용 가능한 관측소를 조사하였다. 총 71개의 관측소에서 자료를 수집하였고 기저유출분리 프로그램인 BFLOW와 WHAT을 적용하여 직접유출과 기저유출을 분리하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약하였다.

본 연구에서 산정한 최근 5년 동안 한강수계에서 평균 연 유량은  $33.76 \text{ km}^3/\text{year}$ 로 행주대교에서 가장 크게 관측되었고  $0.05 \text{ km}^3/\text{year}$ 로 우이관측소에서 가장 낮게 관측되었다. 따라서 우이관측소에 영향을 주는 유역에 대하여 기후, 수자원, 인구, 산업구조, 수자원 이용량 등과 같은 유역 특성을 보다 정밀히 파악하여 하천유량의 건전성 및 이용성을 더욱 개선할 필요가 있다.

본 연구에서 도출된 기저유출비는 BFLOW의 경우  $0.42 \sim 0.78$ , WHAT의 경우  $0.42 \sim 0.70$ 의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이에 대해 방법론적으로 접근방법이 다른 BFLOW와 WHAT은 기저유출비 산정에 있어 매우 유사한 결과를 도출하여 일관성있는 기저유출을 산정하였다. 한강수계에서 기저유출이 하천에 기여하는 비율이 50%가 넘는 관측소는 총 71개 관측소 중 54개인 76%로 파악되었다.

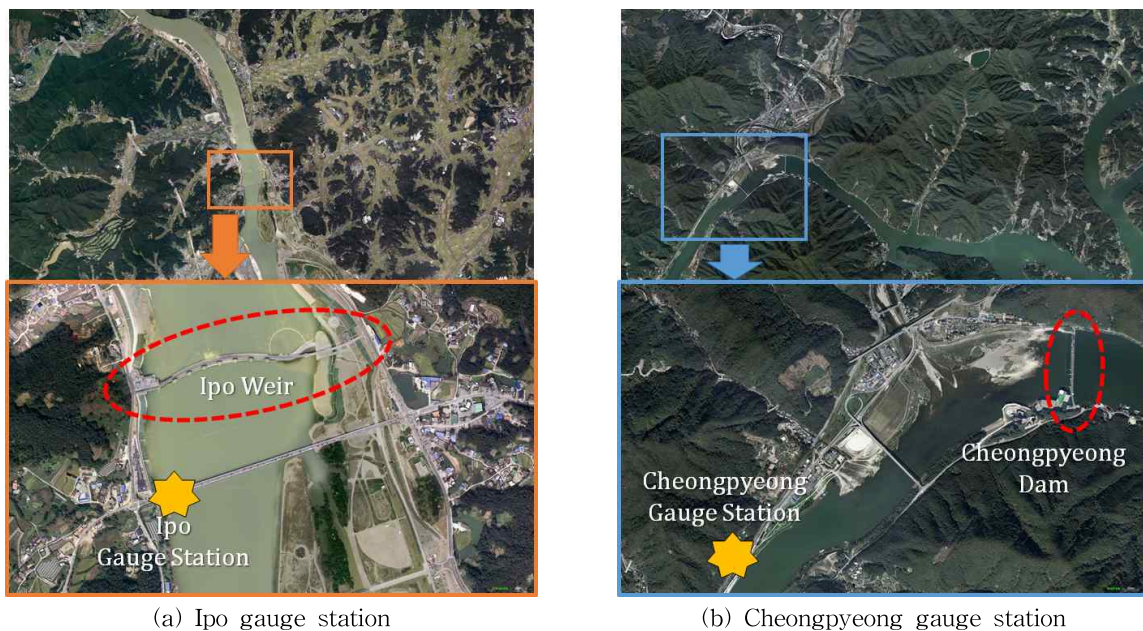


Fig. 10. Gauge Stations Affected by Hydraulic Structures (map source: NAVER)

기저유출비의 값이 작을수록 직접유출의 영향이 크기 때문에 이러한 관측소를 포함하는 수계에서는 우기 시 홍수 및 토사유실과 같은 직접유출 증가에 의한 피해를 줄이기 위해 노력해야 하며, 도시계획에 있어서도 가급적이면 불투수층 면적을 줄여 직접유출의 증가를 방지하는 대책이 필요하다.

한강수계에서 기저유출비가 가장 큰 관측소와 가장 작은 관측소에서의 하천 일유량의 변동계수를 산정하였다. 그 결과 하천의 변동계수는 최소 기저유출비를 갖는 관측소에서 최대 기저유출비를 갖는 관측소보다 약 3.4배 더 큰 것으로 산정되었다. 변동계수가 클수록 강우사상과 같은 기후적 영향이나 취수와 같은 인위적 영향에 따라 하천의 변동성이 증가하여 기저유출비가 작아질 가능성이 높다. 이와 관련하여 일유량의 변동계수가 작을수록 기저유출비가 큰 경향을 보일 것으로 판단된다. 이를 위해서 추후 하천 및 강우의 변동성과 기저유출비의 상관관계를 분석하는 것이 필요하다.

문순기후에 의한 강우집중 및 도시화로 인한 불투수층 증가로 인하여 한강수계의 하천특성은 직접유출비가 기저유출비보다 상대적으로 클 것으로 기대했으나 한강수계의 하천특성은 기저유출비가 더 크게 산정되었다. 이와 관련하여 국내 하천은 자연적인 기저유출뿐만 아니라 인위적인 댐이나 저수지의 방류량 혹은 보의 영향으로 기저유출비가 더 높아질 수 있다고 판단된다. 이러한 판단은 국내에서 기저유출비가 가장 높은 두 관측소 상류에 위치한 댐과 보에 의해 뒷받침된다. 따라서 국내의 하천은 인위적 요소에 의한 영향으로 인하여 기저유출분리라는 정의보다 직접유출분리로 인하여 직접유출과 직접유출이 아닌 유량(기저유출 + 인위적 요소)로 구분할 필요가 있다.

본 연구에서 도출한 결과는 국가적 차원에서 효율적 하천관리를 위해 직접유출과 기저유출의 기여도에 따라 계절별 강우특성 및 갈수량 등을 고려하여 하천을 조절할 수 있는 발판을 마련할 것으로 기대한다. 그러나 본 연구는 기저유출의 관측자료 부재 및 댐과 보의 영향을 정량화하는데 있어 제한적이기 때문에 자연적 기저유출을 파악하는데 한계점을 가지고 있다. 따라서 보다 정확한 하천특성을 파악하기 위해서 하천유량뿐만 아니라 직접유출과 기저유출에 대한 자료 확보 및 연구가 지속되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Project (No:

2014000540003) “한국형 표토 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- Ahiablame, L., Chaubey, I., Engel, B., Cherkauer, K., and Merwade, V. (2013). “Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA.” *Journal of Hydrology*, Vol. 476, pp. 13-27.
- Anderson, M.G., and Burt, T.P. (1978). “Experimental investigations concerning the topographic control of soil water movement on hillslopes.” *Z. Geomorphol.*, Vol. 29, pp. 52-63.
- Anurag, S. (2010), Application and Evaluation of WEPP in a Forested Watershed with Perennial Streams, MS Thesis, Auburn University, AL
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R., and Bernhardt, G. (1995). “Automated baseflow separation and recession analysis techniques.” *Ground Water*, Vol. 33, No. 6, pp. 1010-1018.
- Arnold, J.G., and Allen, P.M. (1999). “Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records.” *J. American Water Resource Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 411-424.
- Chapman, T.G. (1991). Comment on “Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses” by R.J. Nathan and T.A. McMahon, *Water Resour. Res.*, Vol. 27, No. 7, pp. 1783-1784.
- Chapman, T.G., and Maxwell, A. (1996). “Baseflow Separation - Comparison of Numerical Methods With Tracer Experiments.” 23rd Hydrology and Water Resources Symposium, Hobart, Institution of Engineers Australia, Hobart, Tasmania, pp. 539-545
- Cho, S.H. (2006). Computation of baseflow contribution to streamflow using environmental tracers in three small catchments Yuseong, Daejeon. PhD Dissertation, Choongnam National University, Deajeon. [Korean Literature]
- Du, X. (2012). Quantifying And Differentiating Impacts Of Climate Variation, Instream Modification, And Anthropogenic Land Use Change On River Hydrological And Geomorphologic Processes, PhD Dissertation, Florida State University, Tallahassee, FL

- Eckhardt, K. (2005). "How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 2, pp. 507-515.
- Jeon, S.M., Park, J.H., and Park, C.G. (2012). "Development of Technique for Evaluating Streamflow Depletion in the Urbanized Small and Medium Watershed." *Korean Review of Crisis & Emergency Management*, Vol. 8, No. 6, pp. 51-65 [Korean Literature]
- Ji, D.G. (2011). Correlation Analysis between Groundwater Level and Baseflow Using WHAT SYSTEM in Han River Watershed, MS Thesis, Kookmin University, Seoul. [Korean Literature]
- Kang, D.S. (2011). Study on the change of river discharge and baseflow considering urbanization and climate change, MS Thesis, Kookmin University, Seoul. [Korean Literature]
- Kang, H.W., Ryu, J.C., Kum, D.H., Jeong, Y.H., Lim, K.J. (2012). "Application of seasonal Alpha Factor using SWAT BFlow program." Proceeding of the 2012 conference of Korea Water Resource Association, Korea Water Resource Association, pp. 462-462. [Korean Literature]
- Kedareswarudu, U., and Kumar, S. (2013). "Estimation of contribution of springs to ASAN River watershed of DOON valley through baseflow-Hydrograph Method." *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, Vol. 3, No. 1, pp. 69-82.
- Kum, D.H., Moon, J.P., Ryu, J.C., Kang, H.W., Jang, W.S., and Lim, K.J. (2011). "Analysis of Baseflow at Major Rivers using Web-based SWAT Bflow System." Proceeding of the 2011 conference of Korea Water Resource Association, Korea Water Resource Association, pp. 462-462. [Korean Literature]
- Lim, K.J., Engel, B., Tang, Z., Choi, J., Muthukrishnan, S., and Tripathy, D. (2005). "Automated Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool, WHAT." *Journal of the American Water Resource Association*, Vol. 41, No. 6, pp. 1407-1416.
- Lyne, V., and Hollick, M. (1979). "Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. In: Hydrology and Water Resources Symposium, Berth." 1979 Proceedings. National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, Australia. pp. 89-92.
- Nam, K.H., Kim, G.B., and Jeong, G.C., (2013). "Baseflow Comparison using the WHAT system and Flow Rate Measurements in the Dry and Rainy Seasons." *The journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 2, pp. 117-125. [Korean Literature]
- 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, USA.
- Willems, P. (2009). "A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 24, pp. 311-321.

paper number : 15-009  
 Received : 5 February 2014  
 Revised : 27 February 2015 / 13 March 2015  
 Accepted : 13 March 2015