

WHAT 시스템을 이용한 정확한 기저유출 분리를 위한 BFI_{max} 값 산정

주상욱^{*} · 박윤식 · 김종건 · 허성구 · 김기성 · 최중대 · 임경재[†]

강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부

Estimation of BFI_{max} value for Accurate Baseflow Separation using WHAT system

Sang-wook Joo^{*} · Youn-shik Park · Jong-gun Kim · Sung-Gu Heo · Ki-Sung Kim · Joong-dae Choi and Kyoung-Jae Lim[†]

Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

ABSTRACT

강우시 물은 지표면으로부터 증발, 침투하거나 지표면을 통한 유출로 하천이나 강으로 흘러들어간다. 이 중 유출은 강수와의 관계를 규명하여 수문해석을 하는데 가장 중요한 부분을 차지한다. 실무적인 목적으로 유출해석을 할 경우에 하천을 통한 총 유출은 일반적으로 직접유출(direct runoff)과 기저유출(base flow)로 분류하게 된다. 직접유출은 강수나 눈이 녹은 직후 하천으로 비교적 단시간에 흘러 들어가는 유출의 한 부분을 말하며 기저유출은 맑은 날씨에서의 유출로, 비가오지 않을 때 이전에 내린 비의 영향으로 하천을 통해 빠져 나오는 유출의 일부분이라 할 수 있다. 기저유출은 하천의 형성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있고 얕은 지하수 대수층의 특성을 정량화하는 것이 지속적인 지하수 사용과 농업 및 공업용수로서의 지표수 이용 및 폐수 배출에 따른 하류하천에서의 오염 영향 분석을 위해 중요하다. 이러한 기저유출 분석을 위해 최근에는 디지털 필터링 방법이 많이 이용되고 있다. 그 중 Web based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) 시스템은 Eckhardt filter를 이용하는데, 이 Eckhardt filter에서 BFI_{max} 값은 대수층의 특성을 나타내는 값이다. Eckhardt 필터의 경우 Eckhardt가 제시한 BFI_{max} 0.25, 0.50, 0.80 값이 있는데 이에 따라서 분리된 직접유출과 기저유출에 상당히 많은 차이가 난다. 따라서 WHAT 시스템의 강우사상별 수문곡선자료를 이용하여 감수곡선경향에 따라 BFI_{max} 값을 산정하는 모듈을 통해 유역의 특성이 고려된 최적의 BFI_{max} 값을 이용하여 직접/기저유출을 분리할 수 있다. 본 연구에서는 미국 인디애나 주에 있는 Little Eagle Creek (LEC)의 1960년부터 2006년까지의 총 47년 일별유량자료의 수문 곡선 중 감수 곡선을 이용하여 BFI_{max} 값 산정에 대해 분석하였다. 그러나 본 연구결과에서와 같이 BFI_{max} 값을 산정하는 데에 있어 연구 대상지역에 다소 다른 경향의 BFI_{max} 값이 산정 될 수 있음을 알 수 있다. 이는 디지털 필터링에 있어서 역시 약간의 주관적인 산정 방법이 될 수 있음을 보여준다. 따라서 이러한 디지털 필터링의 문제점을 보완하여 보다 객관적이며 타당한 BFI_{max} 값 산정에 대한 연구가 활발히 진행되어 이를 이용한 직접/기저

* Corresponding author: Kyoung-Jae Lim, Tel: +82-33-250-6468, Fax: +82-33-251-1518, E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr

유출이 이루어져야 하며 이를 이용하여 효율적인 수자원 관리 및 비점원 오염 연구에 이용되어야 할 것으로 판단된다.

Key words : 기저유출 분리, 대수층, WHAT

I. 서 론

강우시 물은 지표면으로부터 증발하거나 침투하고 또는 지표면을 통한 유출을 통해 하천이나 강으로 이동하게 된다. 이 유출은 다른 흐름 성분과 함께 강우의 일부분으로 영구적 또는 간헐적으로 지표하천을 통해 흐르는 흐름으로 유역출구 지점에서 관측된다. 유역에 강수가 발생한 후 여러 경로를 통해 최종적으로 유역출구에서 유출로 나타나며 강수와 유출간의 관계를 규명하여 수문설계에서 다양하게 활용하기 때문에 강수와 함께 유출은 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 강수로 내린 물이 유역 출구기점까지 흘러가는 과정은 크게 지표면유출(surface runoff), 지표하유출 또는 중간 유출(subsurface runoff), 그리고 지하수유출(groundwater runoff)로 구성되지만 실무적인 목적으로 유출해석을 할 경우에 하천을 통한 총 유출은 일반적으로 직접유출(direct runoff)과 기저유출(base flow)로 분류하게 된다. 직접유출은 강수나 눈이 녹은 직후 하천으로 비교적 단시간에 흘러 들어가는 유출의 한 부분을 말하며 지표면유출, 지표하유출 중 단기간에 유출되는 조기지표하유출 그리고 하천 수로 위로 직접 떨어지는 수로상 강수는 비교적 양이 적기 때문에 일반적으로 지표면 유출에 포함시키게 되며, 직접유출은 경우에 따라서는 지표하유출의 일부만 고려하지 않고 전체를 포함하거나 또는 제외시키고 분석을 하게 된다. 기저유출은 맑은 날씨에서의 유출로, 비가오지 않을 때 이전에 내린 비의 영향으로 하천을 통해 빠져 나오는 유출의 일부분이라 할 수 있다. 기저유출은 지하수유출과 지체지표하유출로 구성된다. 이러한 유출

중 기저 유출은 하천의 형성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 얕은 지하수 대수층의 특성을 정량화하는 것이 지속적인 지하수 사용과 농업 및 공업용수로서의 지표수 이용 및 폐수 배출에 따른 하류하천에서의 오염 영향 분석을 위해 중요하며 지난 100여 년간 기저 유출 감수 특성을 조사하기 위하여 수문학자들에 의해 많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 기저 유출 특성 분석을 위해 최근에는 디지털 필터링 방법이 많이 이용되고 있다(Lim et al., 2005). 이러한 직접/기저 유출 분리를 위한 시스템인 Web based Hydrograph Analysis Tool (WHAT, <http://www.Envsys.co.kr/~what>)은 대수층의 특성을 고려한 Eckhardt filter (Eckhardt, 2005)를 이용하는데, 이 Eckhardt filter에서 BFI_{max} 값은 대수층의 특성을 나타내는 값으로서 수문분석 결과 값에 많은 영향을 준다(Eckhardt, 2005). 이에 본 연구에서는 미국 인디애나 주에 있는 Little Eagle Creek (LEC)의 유량 자료를 이용하여 대수층 특성을 나타내는 BFI_{max} 값 산정에 대해 분석하였다.

II. 연구지역 선정

본 연구에서는 미국 인디애나 주에 있는 Little Eagle Creek (LEC) 지역을 연구 대상 지역으로 선정하였으며, LEC 지역은 68% 이상지역이 도시 지역이다(김 등 2007). 배수 면적을 52.58km^2 로 갖으며, 경도 $39^{\circ}47'15''$ 위도 $86^{\circ}13'43''$ 에 위치하는 USGS Station 03353600의 유량 자료를 이용하였으며(Fig. 1.), 1960년부터 2006년까지의 총 47년의 일별 자료를 이용하여 분석하였다.

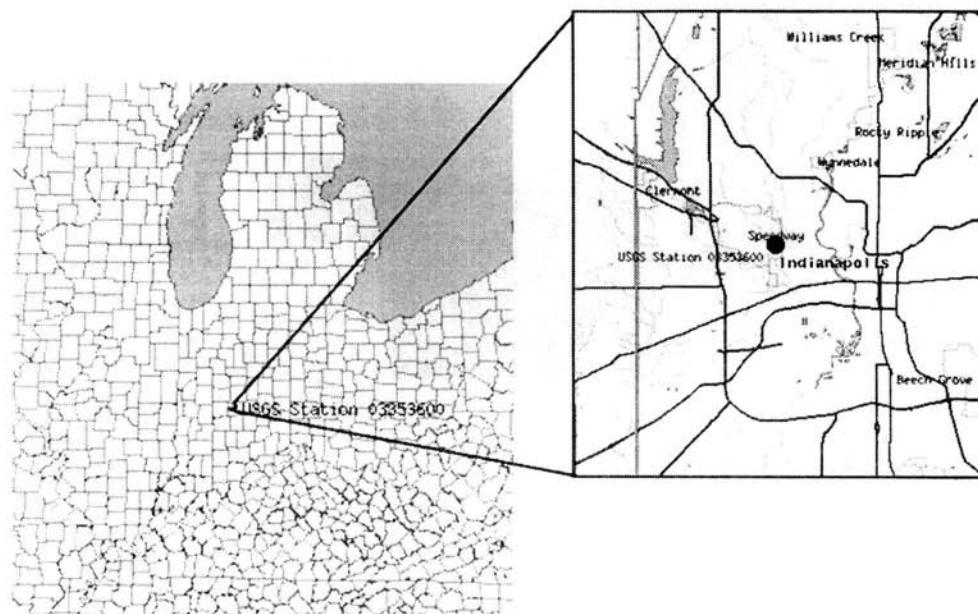


Fig. 1. Location of USGS Station 03353600

III. WHAT 시스템의 개요

1. WHAT 시스템을 이용한 직접/기저 유출 분리

하천 유량자료로부터 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법에는 많은 방법이 있다. 그 동안 많이 이용되어 오던 그래픽 방법의 주관적인 면을 배제하기 위하여 USGS(US Geological Survey) HYSEP (Sloto et al., 1996) 같은 기저 유출 분리 프로그램에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 DOS 기반의 HYSEP은 프로그램에 데이터를 입력하고 실행하는데 있어 많은 어려움이 있다. 최근에는 사용의 편리성 때문에 디지털 필터 기반의 기저유출분리 프로그램이 많이 이용되고 있다. 그 중 많이 이용되어 오던 디지털 필터 기반의 BFLOW 필터(Lyne et al., 1979; Arnold et al., 1999)는 유역내 대수층 특성을 전혀 고려 하지 않는 단점이 있다. 그리하여 Eckhardt(2005)는 유역 내 대수층 특성을 고려하여 기저유출을 분리하는 모듈을 제안하였다. Eckhardt 필터를 이용하여, 기저유출 분리시 이용되는 BFI_{max} (BaseFlowIndexmax) 값 선정에 있어 주관적인 요소를 최소화하기 위해

Eckhardt(2005)는 대표적 대수층 별로 BFI_{max} 대표 값을 제안하였다. 이러한 BFLOW 및 Eckhardt 필터를 이용하여 손쉽게 기저유출을 분리해 내기 위하여 Lim et al.(2005)에 의해 개발된 시스템이 Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT)이다. Fig. 2는 WHAT Web GIS 시스템을 보여준다. (WHAT Web GIS system, www.EnvSys.co.kr/~what). 그림에서 보이는 바와 같이 WHAT Web GIS 시스템은 웹브라우저만을 이용하여 손쉽게 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있는 시스템이며, 사용자가 입력 자료를 직접 준비할 필요 없이 WAMIS(국가 수자원 관리 종합정보 시스템,<http://www.wamis.go.kr/>)의 유량 자료를 실시간으로 질의하여 수문분석을 수행하는 사용자 중심 시스템이다.

WHAT 시스템의 Eckhardt 필터를 이용하여 기저 유출 분리시 대표적인 대수층 특성에 따른 BFI_{max} 값을 사용자가 입력해야 한다. 그러나 대부분의 경우 이에 관한 자료 부족으로 인하여 기본값으로 제공되는 값을 이용하여 기저유출을 분리하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 감수곡선의 감수 경향을 이용하여 BFI_{max} 값을 산정하는 WHAT 최

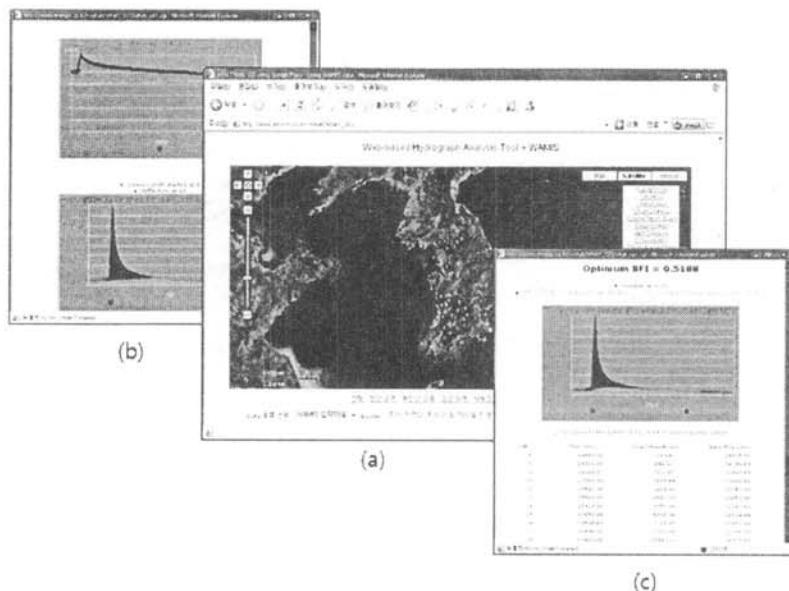


Fig. 2. WHAT Web GIS system (a) WHAT interface, (b) automated recession curve analysis, (c) analysis by optimum BFI_{max}

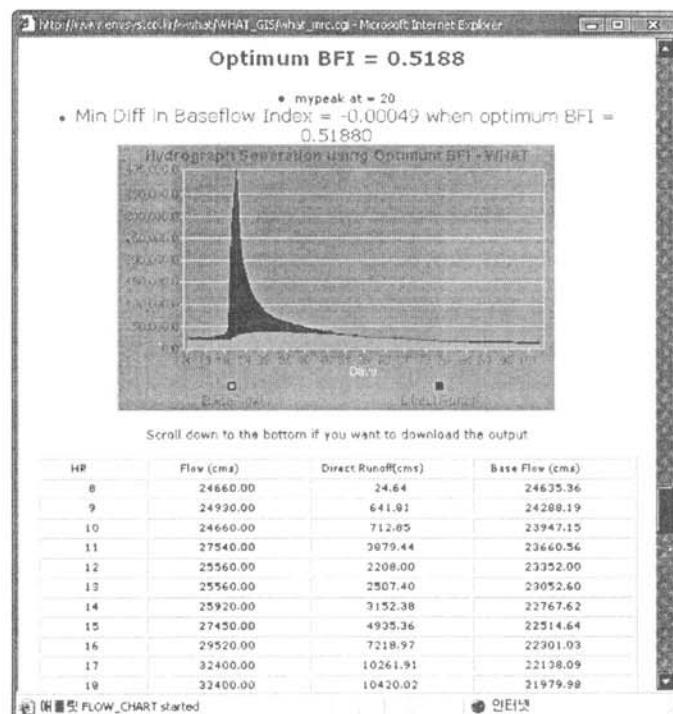


Fig. 3. Optimization module to determine BFI_{max} parameter of the Eckhardt Digital Filter in the WHAT web system

적화 모듈(임 등, 2007)을 통해 LEC 수계에 적합한 BFI_{max} 값을 산정하였고 이를 이용하여 직접유출과 기저유출을 분리하였다. 이를 위해서 LEC 유역의 유량자료 중 감수곡선을 선택하여 WHAT 최적화 모듈을 이용하여 BFI_{max} 값을 산정하였고(Fig. 3), 이를 이용하여 실측유량에서 직접유출과 기저유출을 분리하였다.

2. BFI_{max} 값의 산정 필요성

기존의 기저유출 분리 방법은 장기간의 기저유출 분리에는 매우 비효율적이며, 주관적인 분리방식으로 인해 같은 유량 자료를 사용하더라도 다른 결과가 발생할 수 있는 단점이 있다. 이에 보다 객관적이고 효율적인 방법이 유역의 특성이 잘 반영되는 감수곡선을 이용하여 기저유출을 분리하는 방법이다. 유역내 유량자료중 여러 강우사상별 감수곡선들을 중첩시켜 유역의 대표적인 감수곡선을 얻어 기저유출 분리를 할 수 있기 때문에, 다른 방법보다는 유역내 대수층의 특성에 따른 감수곡선경향을 잘 분석할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 주지하수 감수곡선방법을 이용하여 장기간의 유량자료에 적용하기에는 여러 가지 어려움이 있다. 따라서 디지털 필터링 방법을 이용하여 기저유출 분리시 유역 수문곡선의 감수곡선을 모의하여 수문분석을 하는 것이 필요하다. Eckhardt 필터의 경우 BFI_{max} 값에 따라서 분리된 직접유출과 기저유출에 상당히 많은 차이가 나는 것을 알 수 있다.

Table 1은 임하댐 지역의 실측유량자료를 이용하여 Eckhardt (2005) 가 제안한 BFI_{max} 0.25, 0.50, 0.80 이렇게 세 가지 값을 이용하여 직접유출과 기저유출을 분리한 것이다. 표에서 보이는 바와 같이 분리된 기저유출량에 있어 BFI_{max} 값이 0.25일 때와 0.50일 때 1.68배, 0.25와 0.80일 때 2.83배 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 Eckhardt 필터를 이용한 수문분석시 유역에 적합한 BFI_{max} 값을 산정하는 것이 얼마나 중요한지를 보여주는 결과이다. 따라서 수문분석이 유역별 BFI_{max} 값을 결정하는 작업이 선행되어야 정확한 직접유출 및 기저유출 현황을 분석할 수 있고, 또한 컴퓨터 모델의 보정

및 검정 작업에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. BFI_{max} 값에 따른 총/직접/기저유출 비교

BFI_{max}	Total Flow ($\times 10^6$ cms)	Direct Flow ($\times 10^6$ cms)	Base Flow ($\times 10^6$ cms)
0.25	4,218	3,646	571
0.50	4,218	3,257	960
0.80	4,218	2,598	1,619

Eckhardt 필터를 이용하여 기저유출 분리시 대표적인 BFI_{max} 값에 따라서 분리된 직접유출과 기저유출 결과에는 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 비록 대수층 특성별로 대표적인 BFI_{max} 값을 제시하였지만, 사용자가 각 유역내 대수층의 특성에 따라 BFI_{max} 값을 결정하기에는 한계가 있다. 따라서 유역내 대수층의 특성이 반영되어 나타나는 수문곡선의 감수곡선을 분석하여 BFI_{max} 값을 산정한다면, 보다 유역의 특성을 반영하여 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있을 것이라 판단된다. 이에 임 등 (2007)은 강우사상별 수문곡선자료를 이용하여 감수곡선경향에 따른 최적의 BFI_{max} 값을 산정할 수 있는 모듈을 개발하여 WHAT Web GIS 시스템에 추가하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 감수곡선을 분석할 결과와 Eckhardt 필터를 이용하여 분석한 결과의 차이가 가장 작을 때의 BFI_{max} 값을 최적의 BFI_{max} 값으로 결정하여 장기간의 수문분석에 이용한다.

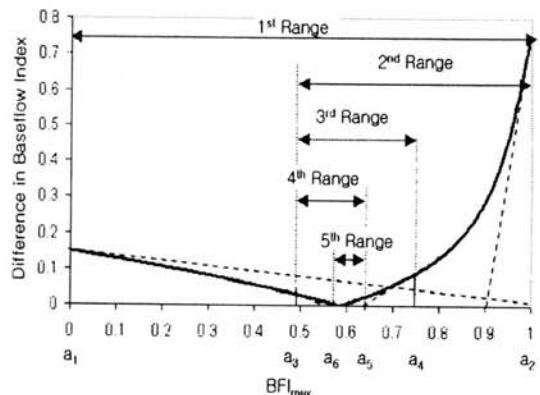


Fig. 4. Module of WHAT system to determine BFI_{max} parameter

이 BFI_{max} 값은 대수층의 특성을 나타냄과 동시에 유출의 특성을 결정짓는 데에 있어 매우 중요한 값으로 유역내 고유의 대수층 특성 뿐만 아니라, 계절 등과 같은 시간적으로 변하는 대수층의 특성을 고려하여 산정되어야 물리적·시간적인 특성이 고려된 BFI_{max} 값이 될 수 있으며, 또한 이를 고려한 유출 특성을 분석 할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 이러한 대수층의 고유의 특성을 고려할 뿐만 아니라, 시간적으로 변하는 대수층의 특성을 고려한 BFI_{max} 값을 산정하기 위하여 해당 연구지역에 대한 미국 지질 조사서 (www.usgs.gov, USGS)의 1960~2006년 까지의 일별 유량 자료를 이용하여 분석하였다.

IV. 연구 방법

본 연구에서는 WHAT 시스템을 이용하여 해당 연구지역에 있어 연구 대상 기간 내, 수문 곡선 중 감수 곡선을 이용하여 BFI_{max} 값을 구하였다. BFI_{max} 값을 산정하기 위한 감수 곡선은 수문 곡선 중 peak 유량에서부터 감수 곡선의 후반부가 거의 최소한 3일 이상 유량 값이 수평을 이루며, 감수 곡선의 후반부에 이르기까지 재차 강우 등과 같은 이유로 인한 영향이 없는, 즉 감수 곡선 내에 다른 감수 곡선이 보이지 않는 수문 곡선 값만을 이용하여 분석하였다(Fig. 5).

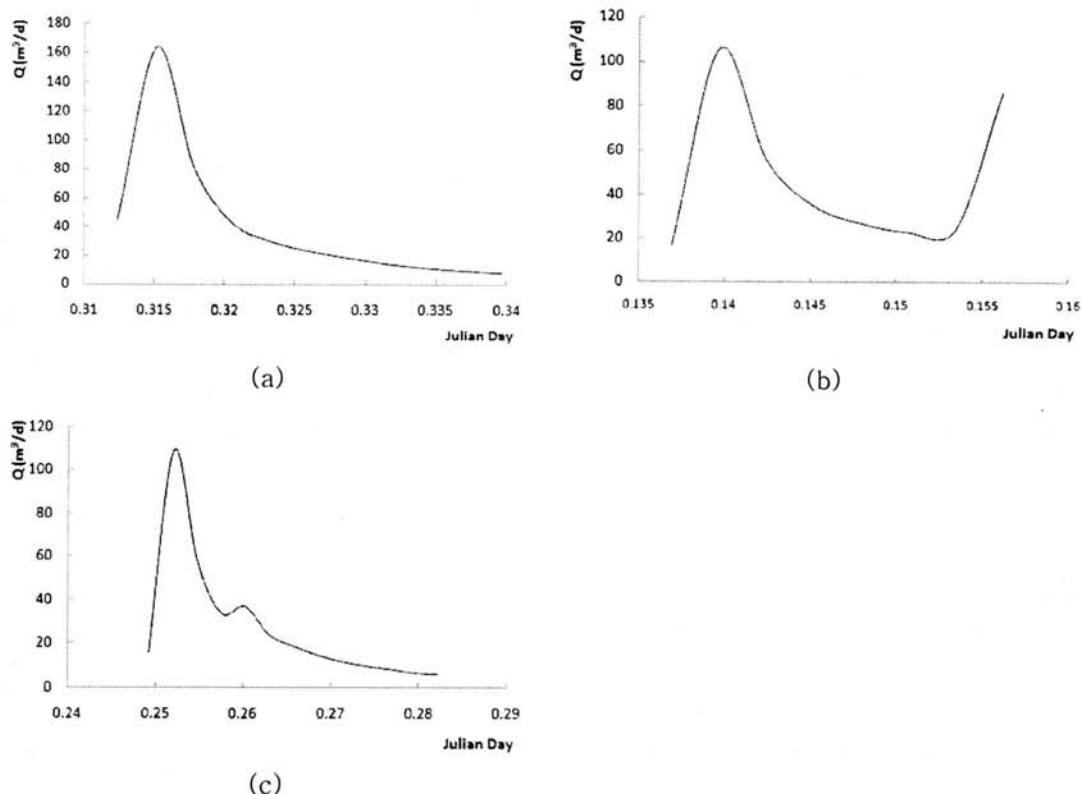


Fig. 5. Types of recession curve

Fig. 5. (a)에서 보이는 바와 같이 감수 곡선의 유량의 변화가 피크 시점 이후의 강우 등의 요인이 없이 유량이 감소하는 경향을 보이며 감수 곡선의

후반부에서 유량의 변화 폭의 거의 없는 즉, 곡선이 거의 수평을 이루는 감수곡선만을 이용하여 BFI_{max} 값을 산정하였다. Fig. 5. (b)에서 보이는 바

와 같이 피크 시점 이후로 유량의 증가없이 감소하는 경향을 보이나, 후반부에서 곡선이 수평을 이루지 않고 다시 상승하는 경향을 보이는 감수 곡선과 Fig. 5. (c)에서 보이는 바와 같이 곡선의 후반부에서 거의 수평을 이루는 경향을 보이나 피크 시점 이후로 유량이 감소하는 과정에서 다른 강우 등의 다른 원인으로 인하여 다시 상승하는 경향을 보이는 감수 곡선은 BFI_{max} 값을 산정하는 데 있어 사용하지 않았다. 이러한 수문 곡선에 의한 BFI_{max} 값의 시간적인 요인을 고려하기 위해 조건을 만족하는 수문 곡선의 피크 시점의 Julianday를 365(윤달을 포함한 경우 366)으로 나눈 값 즉 0 ~ 1로 시간적인 요인을 표시하였다.

V. 결 과

Fig. 6.은 BFI_{max} 값을 산정하기 위한 조건을 만족하는, 연구 지역의 해당 기간 동안의 수문 곡선은 690여개였으며, 시간 (Julian day / 365, 366)의 값에 대한 BFI_{max} 값에 대한 산점도를 표시한 것이다. 그럼에서 보이는 바와 같이 다소 매년에 걸쳐 BFI_{max} 값이 약 0.9 ~ 1.0의 경향을 보이기는 하나, R^2 값이 0.017로 매우 낮은 값을 보였다. 또한 Julianday / 365의 값이 약 0.5 ~ 0.8의 기간 동안은 다른 기간에 비해 BFI_{max} 값이 넓게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

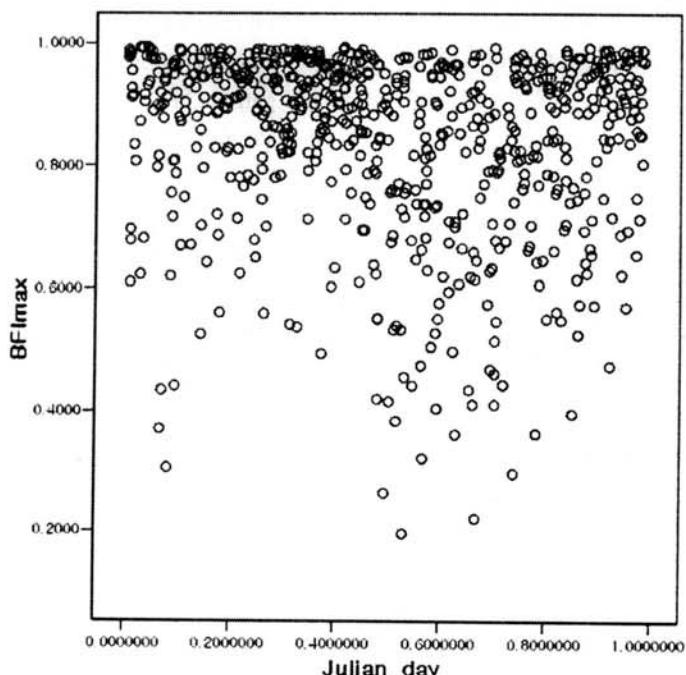


Fig. 6. Scatter diagram of BFI_{max}

VI. 결 론

지난 100여 년간 기저 유출 감수 특성을 조사하기 위하여 수문학자들에 의해 많은 연구가 수행되어 왔다. 이 기저 유출은 하천의 형성에 큰 영향을

주는 것으로 알려져 있기 때문에 얕은 지하수 대수층의 특성을 정량화하는 것이 매우 중요하며 이를 통하여 효율적인 수자원 관리를 하여야 한다. 이러한 기저 유출의 특성을 고려하기 위해서는 하천의 총 유량으로부터 직접 유출과 기저 유출을

분리하는 과정이 선행되어야 하며, 이러한 직접/기저 유출 분리에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구 중, 최근 디지털 필터링을 이용한 방법이 활발히 진행되고 있다.

이에 WHAT 시스템을 이용하여 연구 대상 지역에 있어 BFI_{max} 값을 산정하여 이 지역의 대수층 특성을 고려한 BFI_{max} 산정하기 위한 연구를 진행하였다. 그러나 본 연구 결과에서와 같이 BFI_{max} 값을 산정하는 데에 있어 연구 대상지역에 다소 다른 경향의 BFI_{max} 값이 산정 될 수 있음을 알 수 있다. 이는 디지털 필터링에 있어서 역시 약간의 주관적인 산정 방법이 될 수 있음을 보여준다. 따라서 이러한 디지털 필터링의 문제점을 보완하여 보다 객관적이며 타당한 BFI_{max} 값 산정에 대한 연구가 활발히 진행되어 이를 이용한 직접/기저 유출이 이루어져야 하며 이를 이용하여 효율적인 수자원 관리 및 비점원 오염 연구에 이용되어야 할 것으로 판단된다.

VII. 참고 문헌

- 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.
- Eckhardt, K. 2005. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. *Hydrological Processes* 19(2):507-515.
- Lim, K. J., B. A. Engel., Z. Tang., J. I. Choi, K. Kim. S. Muthukrishnan, and D. Tripathy, 2005. Automated Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool, WHAT. *Journal of the American Water Recourse Association*, 41(6):1407-1416.
- Lyne, V.D. and M. Hollick, 1979. Stochastic Time-Cariavle Rainfall-Runoff Modeling. In: *Hydro. and Water Resour. Symp. Institution of Engineers Australia*, Perth, Australia, pp. 89-92.
- Sloto, R.A. and M.Y. Crouse, 1996. HYSEP: A Computer Program for Stream Flow Hydrograph Separation and Analysis. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4040, 46 pp., Reston, Virginia.
- 김종건, 박윤식, 전지홍, Bernard A. Engel, 안재훈, 박영곤, 김기성, 최중대, 임경재, 2007. 선행토양함수조건(AMC)을 고려한 L-THIA 직접유출 모의 정확성 평가. *한국물환경학회*, 23(4): 474-481(2007)
- 임경재, 박윤식, 김종건, 허성구, 신용철, 유동선, 김기성, 최중대, 2007. Google Map과 WAMIS 자료를 이용한 직접유출/기저유출 분리 시스템의 개발.