



Web GIS 기반 기저유출 분리 프로그램 소개

(Web-based Hydrograph Analysis Tool: WHAT<https://engineering.purdue.edu/~what>)



류 지 철
강원대학교 지역건설공학과 박사과정
swatremm@gmail.com



강 현 우
강원대학교 지역건설공학과 박사과정
hwkang1985@gmail.com



임 경 재
강원대학교 지역건설공학과 교수
kjljm@kangwon.ac.kr

1. 직접유출/기저유출 분리의 필요성 및 분리 모형

유역에서 강우가 발생하면 하천의 유량이 증가하고 첨두유량에 도달하면 감수하기 시작한다. 강우가 끝난 후에도 유출은 지속되는데, 이렇게 시간에 따른 유출량의 변화를 나타내는 곡선을 유출 수문곡선(Hydrograph)이라 한다(그림 1).

이러한 수문곡선을 직접유출과 기저유출로 분리하는 것을 수문곡선의 분리(hydrograph separation)이라 하며, 이는 지속적인 지하수 사용과 농업 및 공업용수로서의 지표수 이용, 폐수 배출에 따른 하류하천에서의 오염 영향 분석을 위해 매우 중요하다. 하지만 수문곡선은 유역 및 기상 특성에 따라 변화하기 때문에 수

문곡선의 분리는 생각만큼 쉽지 않다. 지난 100여 년 동안 많은 수문학자들에 의해 많은 직접·기저 유출 분리 방법이 연구되었으며 대표적인 방법으로는 주 지하수 감수곡선법(master groundwater depletion curve method), 수평직선분리법(straight line method), N-day 법, 수정 N-day 법, 가변 경사법(variable slope method) 등이 있다. 이를 간단히 설명하면 아래와 같다.

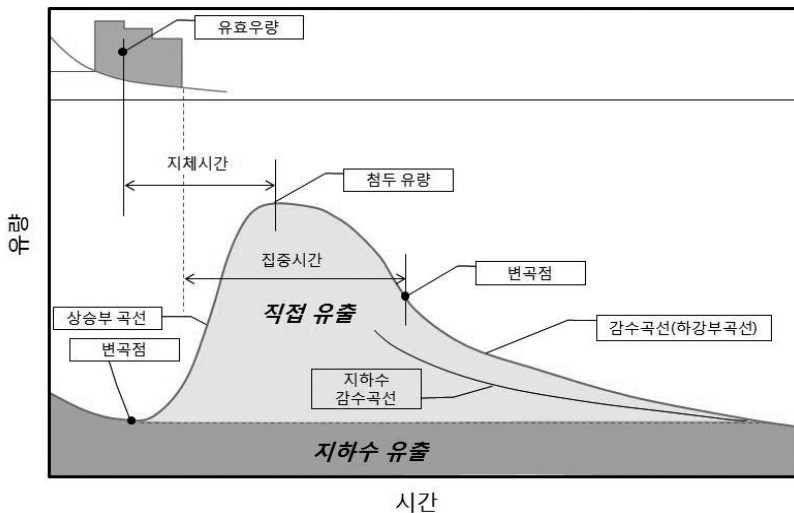


그림 1. 수문곡선의 구성 (윤용남, 2009)



- 주 지하수 감수곡선법: 과거 수문곡선으로부터 수문곡선의 감수곡선들을 중첩시켜 얻은 유역의 대표 지하수 감수곡선으로 직접·기저 유출을 분리하는 방법
- 수평직선 분리법: 지표면유출이 발생하는 지점(상승부 기점)에서 감수곡선과 만나는 수평선을 그어 직접·기저 유출을 분리하는 방법
- N-day 법: 첨두 유량이 발생한 시점부터 N일 후의 감수곡선에 해당하는 지점을 택해 직접유출이 발생하는 상승부 지점과 연결하여 직접·기저 유출을 분리하는 방법
- 수정 N-day 법: 고정기저시간법(fixed base method)라고도 불리며 특정 강우가 발생하기 바로 전의 지하수 감수곡선은 강우가 계속되더라도 어느 정도 기간 동안은 감소하게 되는데 이러한 효과를 고려하기 위한 직접·기저 유출 분리 방법
- 가변경사법: 감수곡선에서 경사가 급변하는 지점을 결정하여 그 지점부터 하강부 곡선의 변곡점 발생 시간까지 거꾸로 보간하여 첨두 발생시의 기저유량과 직선으로 연결, 직접·기저 유출을 분리하는 방법.

filtering) 방법이 직접·기저유출 분리 모형이 널리 사용되어 왔다. 하지만 기존의 모형들은 데이터의 입력과 실행, 결과 값의 후처리 과정 또한 매우 복잡하여 사용자가 구동하기에 많은 불편함이 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 모형 구동의 단순화와 자동화, 각 정부기관에서 관측되고 있는 자료를 효율적으로 활용할 수 있는 체계화된 시스템의 필요성이 대두되었으며, Lim et al. (2005)은 비전문가도 쉽게 유역의 유출수 문자료를 이용하여 직접·기저 유출을 분리 할 수 있도록 Web based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) (<https://engineering.purdue.edu/~what>) 시스템을 개발하였다.

2. WHAT(Web-based Hydrograph Analysis Tool) 주요 특징

Web based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) (Lim et al., 2005)은 USGS의 유량자료를 누구나 쉽게 이용하여 직접·기저 유출을 분리 할 수 있도록 Web 기반으로 개발되었으며, 시스템의 개요와 인터페이스는 그림 2, 3 과 같다.

그러나 이러한 방법들은 장기 수문자료 분석에 이용하기에는 그리 효율적이지 못하고 같은 자료를 사용하더라도 분석하는 사람에 따라서 그 결과에 많은 차이가 있을 수 있다. 이에 미국지질조사국(USGS: US Geological Survey)의 자료를 이용한 USGS HYSEP (Sloto et al., 1996), PART (Rutledge, 1998), RECESS (Anderson and Burt, 1980) 등의 모형과 디지털 필터링(Digital

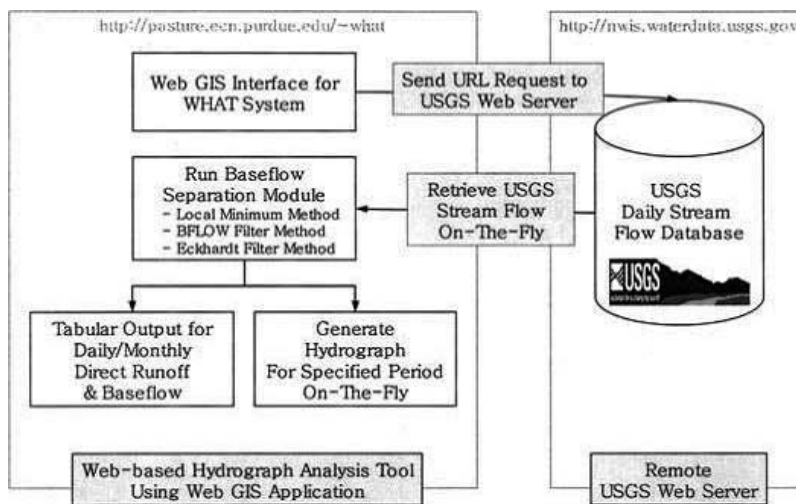


그림 2. WHAT 시스템의 개요 (Lim et al., 2005)

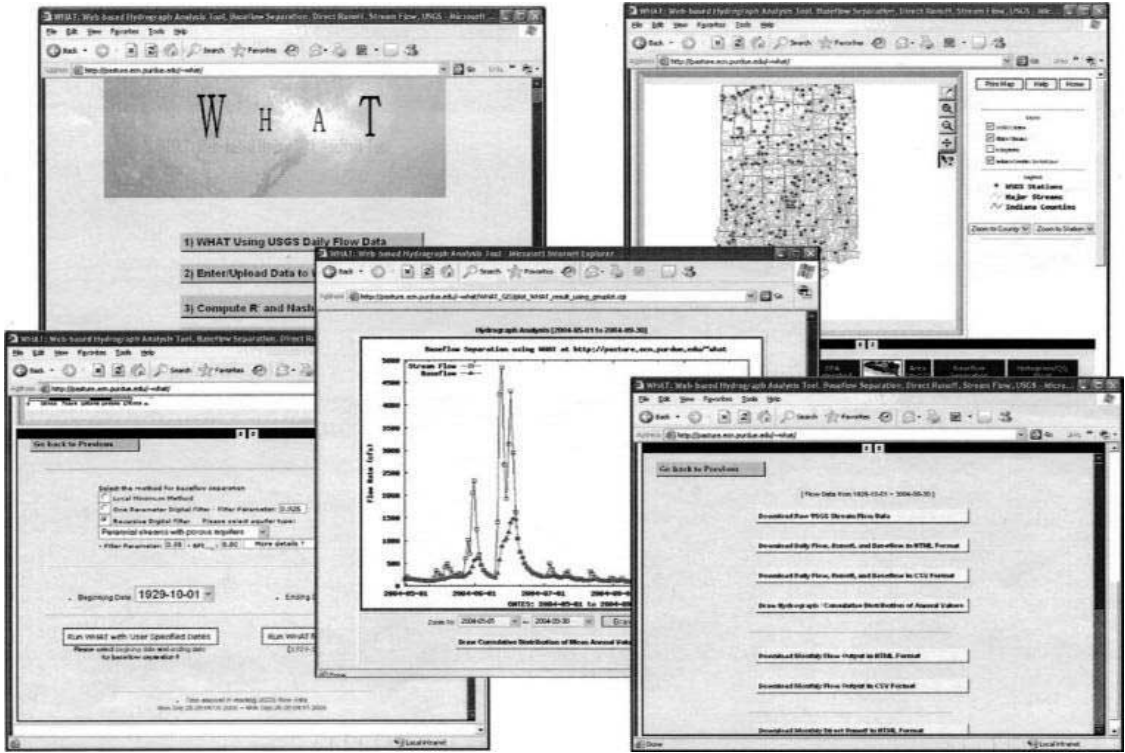


그림 3. WHAT 시스템의 인터페이스 (Lim et al., 2005)

WAHT 시스템에서는 "Local minimum method"와 Lyne and Hollick (1979)의 "BFLOW filter", Eckhardt (2005)의 "Eckhardt filter" 방법을 이용한 직접·기저 유출 분리가 가능하다. Local minimum method는 수문곡선이 그림 4와 같이 수문곡선이 감소하다 다시 증가하는 지역의 최소값을 직선으로 연결하

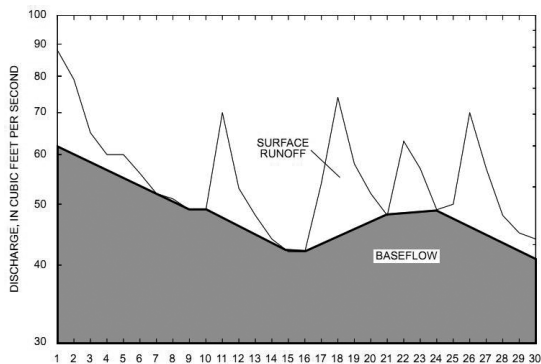


그림 4. Local minimum 방법을 이용한 직접·기저 유출 분리 (Sloto and Crouse, 1996)

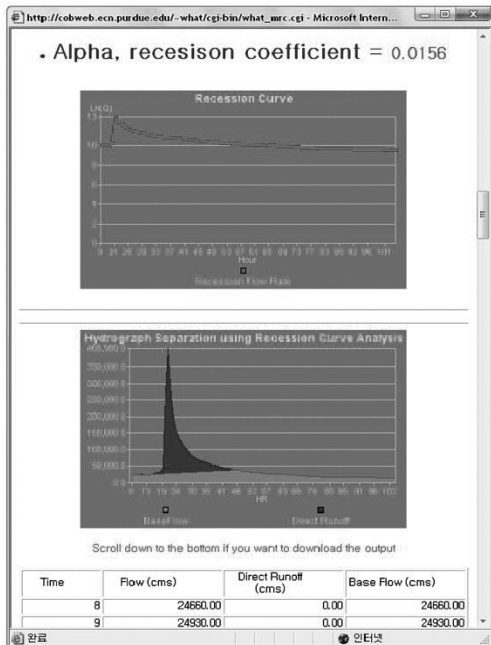
여 직접·기저 유출을 분리하는 방법으로 USGS HYSEP의 방법과 비슷하다.

두 번째 방법은 디지털 필터인 BFLOW filter를 이용하는 방법, 세 번째는 BFLOW filter를 수정하여 대수층의 특성을 고려할 수 있는 Eckhardt filter를 이용하는 방법이다. Eckhardt filter는 대수층의 특성을 BFI_{max} 라는 변수 값으로 반영하며 수문 분석 시 BFI_{max} 값은 직접·기저 유출 값에 상당한 영향을 미친다. Eckhardt filter 공식은 식 (1)과 같으며 b_t 는 t 시간의 기저유출량, b_{t-1} 은 t-1 시간의 기저유출량, α 는 filter parameter BFI_{max} 는 장기간의 총 유출량에 대한 기저유출량의 비의 최댓값으로서 대수층의 특성을 대변한다. Eckhardt (2005)는 항시 흐르는 하천에 대해서는 0.8의 BFI_{max} 값을 이용하도록 권장하고 있다.

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

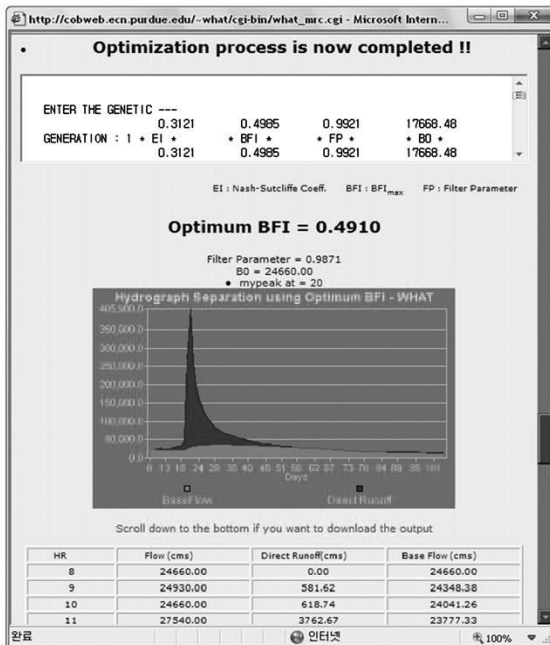


a



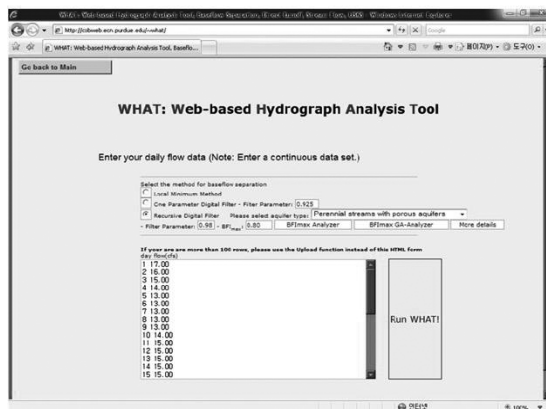
Recession Curve Analysis by WHAT system

b



Determination of BFI_{max} and Filter parameter by BFI_{max} GA-Analyzer Module

c



Interface of WHAT system

그림 5. WHAT 시스템의 GA-Analyzer 모듈 (Lim et al., 2010)

하지만 BFI_{max} 값은 대수층에 특성에 따라 변하기가 쉬우며, 획일화된 BFI_{max} 값은 잘못된 수문 분석 결과를 가져 올 수 있다. 이에 Lim et al.(2010)은 유역의 대수층에 적합한 최적 BFI_{max} 값을 도출하기 위하여 Genetic Algorithms(GA)(Hollan, 1975)을 이용하여 자동으로 최적 BFI_{max} 값을 찾아낼 수 있는 BFI_{max} -

GA Analyzer 모듈을 개발하여 WHAT 시스템을 개선 시켰다(그림 5). 개발된 모듈은 GA 분석을 이용, Eckhardt 방법과 감수곡선을 비교하여 Eckhardt filter의 최적 BFI_{max} 값과 filter parameter 값을 결정하며, 이를 이용하면 수문곡선 자료로 대수층의 특성을 반영한 최적 BFI_{max} 값을 산정 할 수 있다.



3. WHAT 시스템 적용 사례

이렇게 개발된 WHAT system (그림 6)을 여러 유역에 다양한 방법으로 적용하여 실제 적용성을 평가 하였다. 첫 번째로 미국 인디애나 주에 적용하여 Eckhardt filter 방법과 BFLOW filter 방법에 의해 산정된 기저유량 결과를 비교 분석 하였다.

WHAT system의 두 개의 filter 방법에 따른 기저유량을 비교분석한 결과, 인디애나 주 03341500번 유량 관측 지점에서 R^2 및 NSE 모두 0.99로 높은 상관성을 나타냈으며(그림 7), 인디애나 주 임의의 50개 유량 관측 지점에서 Eckhardt filter 방법을 사용한 WHAT system의 기저유량 산정 결과와 BFLOW filter 방법의 기저유량 산정 결과의 R^2 및 NSE가 모두 0.9이상의 결과를 나타내었다(그림 8).

WHAT system의 두 가지 filter 방법에 따른 기저유량 산정 결과를 비교한 이유는 이미 이전 연구에서 BFLOW filter 방법에 따른 기저유량 산정 결과와 인디애나 주 기저유량 측정 자료가 통계학적으로 높은 상

관성을 나타냈기 때문에 BFLOW filter 방법과 Eckhardt filter 방법을 서로 비교 하였고, 본 연구에서 분석한 두 가지 filter 방법에 따른 R^2 및 NSE가 높은 수치로 나타냈기 때문에 WHAT system의 Eckhardt

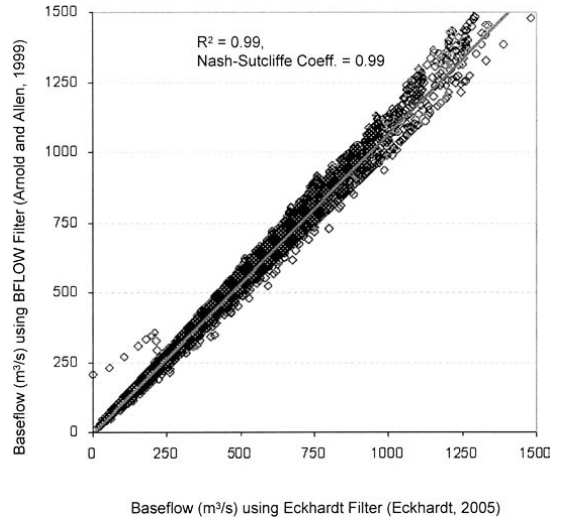
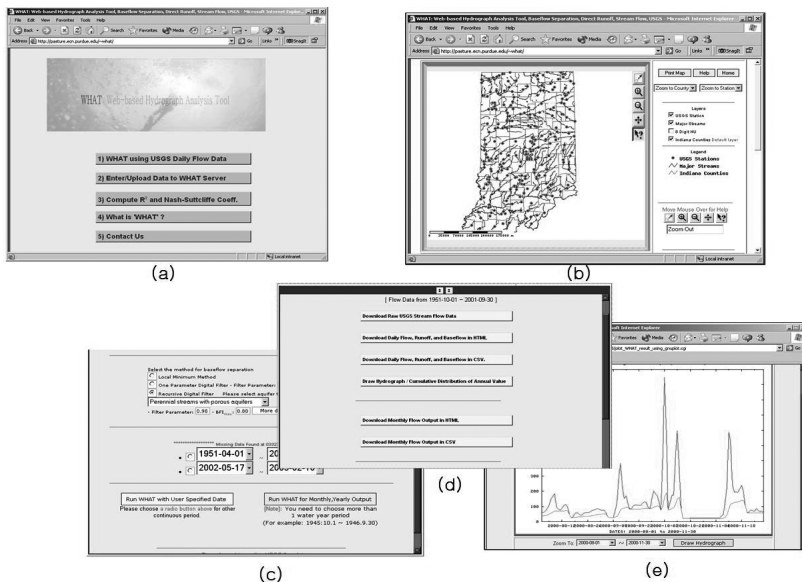
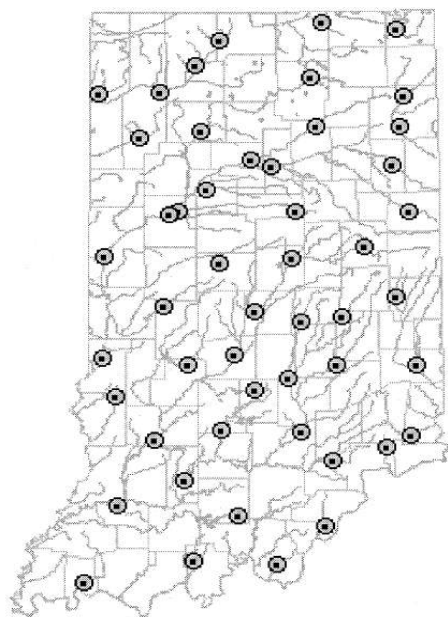


그림 7. 인디애나 주 USGS 03341500번 유량 관측 지점에서 BFLOW filter 와 Eckhardt filter 방법에 따른 기저유량 산정 결과 비교 (Lim et al., 2005)



WHAT Web GIS Interface. **(a)** WHAT Web Interface, **(b)** Web GIS Interface, **(c)** Data Break Checking in USGS Daily Stream Flow Data, **(d)** Daily, Monthly, Yearly Stream Flow, Direct Runoff, and Baseflow Output in Tabular and Spreadsheet Format, and **(e)** Hydrograph for User Specified Time Period

그림 6. Web GIS-based WHAT system (<https://engineering.purdue.edu/~what>)



Nash-Sutcliffe Coefficient

- 0.91 - 0.92
- 0.92 - 0.98
- ⊙ 0.98 - 1.00

그림 8. 50개 인디애나 주 유량 관측 지점에서 BFLOW filter 와 Eckhardt filter 방법에 따른 기저유량 산정 결과 비교 (Lim et al., 2005)

filter방법에 따른 기저유량 결과도 기저유량 측정 자료와 높은 상관성을 나타낼 것으로 판단된다.

또한 GA- Analyzer 모듈이 추가된 WHAT system을 이용하여 미국 인디애나 주 Little Eagle Creek 유역에 적용 후 최적의 BFI_{max} 및 filter parameter를 결정하여 Eckhardt filter 방법에 따라 유량을 직접유출과 기저유출로 분리 후 직접유출에 관한 결과를 L-THIA 모형으로 비교 분석 하였다.

감수곡선 방법과 BFI_{max}-GA Analyzer모듈을 이용한 결과, Little Eagle Creek 유역의 최적의 BFI_{max}는 0.491, filter 변수값은 0.987로 나타났으며, 이 최적의 BFI_{max} 값을 이용하여 분리된 직접유출량 값으로 L-THIA 모형을 보정한 결과 결정계수(R²) 0.66, 그리고 NSE가 0.63으로 나타났다(그림 9). 이 통계치는 기본 BFI_{max} 값(=0.80)을 이용했을 때와 같지만 기본 BFI_{max} 값과 최적 BFI_{max} 값을 이용하여 각각 L-THIA모형을 보정하였을 경우, L-THIA 모형의 예측 직접유출량과 예측 비점오염원에 있어서 많은 차이가 날 수 있다는 것이 그림 11을 통해 나타났다. 그림 10에서 보이는 바와 같이 직접유출량은 약 32.5%, 그리고

Baseflow Separation using Eckhardt Filter (w/ BFI_{max} Value of 0.491 and Filter Parameter Value of 0.987)
R² = 0.66, Nash-Sutcliffe Coeff. = 0.63

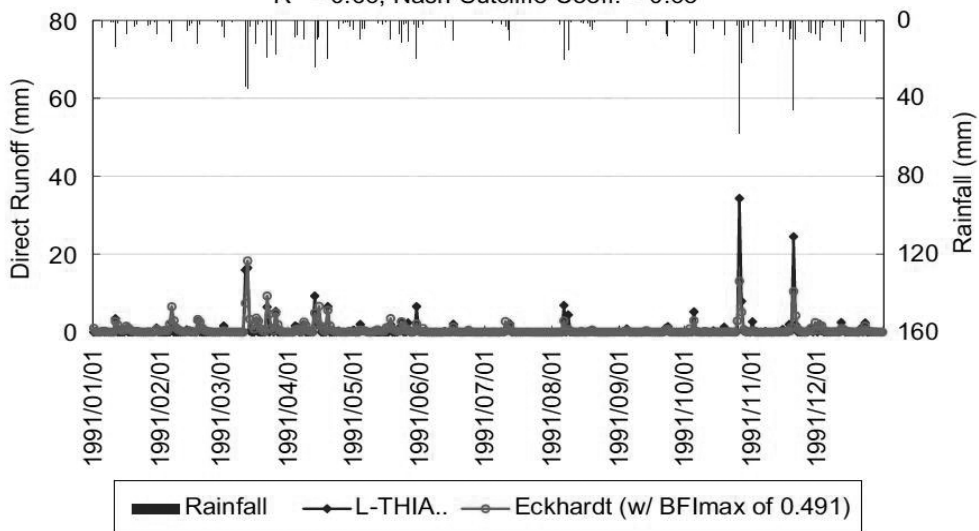


그림 9. Eckhardt 필터 최적 BFI_{max} 값을 이용하여 분리된 직접유출과 L-THIA 모의 직접유출과의 비교 (Lim et al., 2010)



Increases in Direct Runoff and Pollutant Loading
using Optimum w/ BFI_{max} Value of 0.491 and Filter Parameter
Value of 0.987

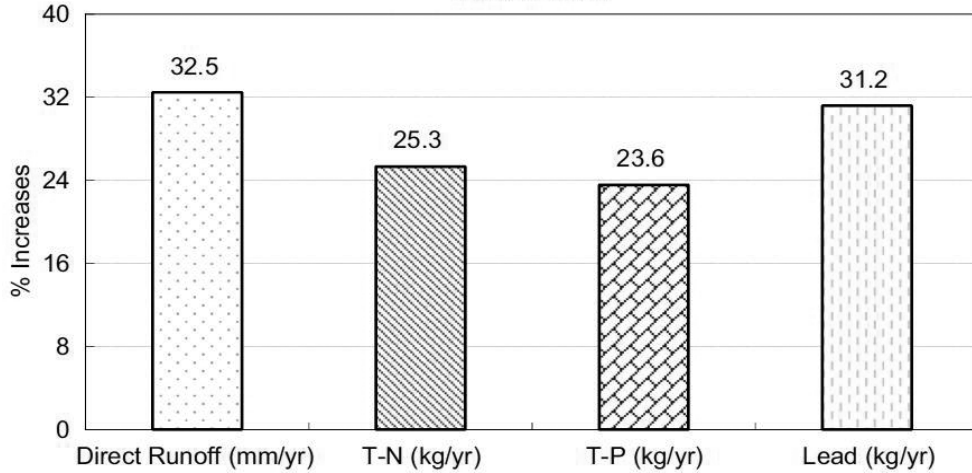


그림 10. 최적 BFI_{max}값과 기본 BFI_{max}(=0.80)을 이용하여 L-THIA모형을 보정시 예측 직접유출량과 비점오염원의 차이 (Lim et al., 2010)

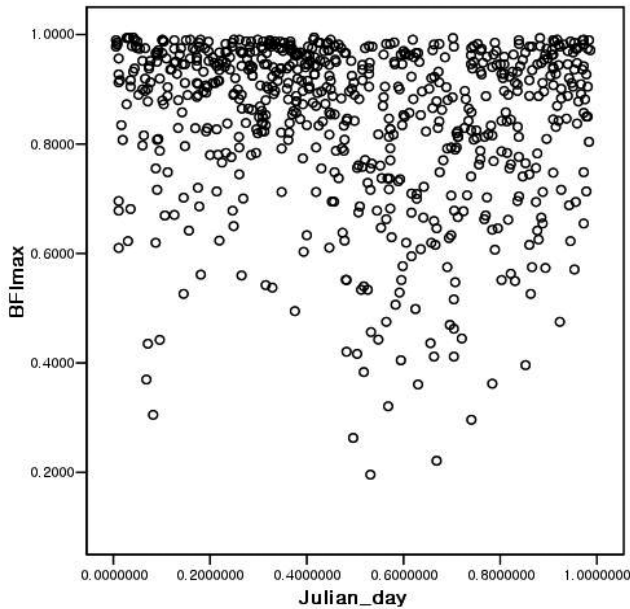


그림 11. Scatter diagram of BFI_{max} (주상욱 등, 2007)

비점오염원은 23% 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 수문/수환경 모형의 정확성 평가시 정확한 수문분석이 선행되어야 정확한 모형의 평가가 이루어질 수 있다는 것을 보여준다.

주상욱 등 (2007)은 BFI_{max} 값이 유역 내 고유의 대

수층 특성 뿐 만 아니라, 계절 등과 같은 시간적으로 변하는 대수층의 특성을 고려하여 산정되어야 물리적 시간적인 특성이 고려된 BFI_{max} 값이 될 수 있다고 보았다. 따라서 주상욱 등 (2007)은 대수층 고유의 특성을 고려할 뿐 만 아니라, 시간적으로 변하는 대수층의 특성을 고려한 BFI_{max} 값을 산정하기 위하여 미국 USGS Station 03353600의 1960~2006년 까지의 일별 유량 자료를 이용하여 분석 하였다. BFI_{max} 값을 산정하기 위한 조건을 만족하는 연구 지역의 해당 기간 동안의 수문 곡선은 690여개였으며, 그림 11은 시간 (Julian day /365, 366) 의 값에 대한 BFI_{max} 값에 대한 산점도를 표시한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 매 해 걸쳐 BFI_{max} 값이 약 0.9~1.0의 경향을 보이기는 하나, R² 값이 0.017로 매우 낮은 값을 보였다. 또한 Julianday / 365 의 값이 약 0.5~0.8의 기간 동안(여름철)은 다른 기간에 비해 BFI_{max} 값이 넓고 낮게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 여름철에 기저유출이 상대적으로 적고 직접유출 비율이 높기 때문인 것으로 판단된다.

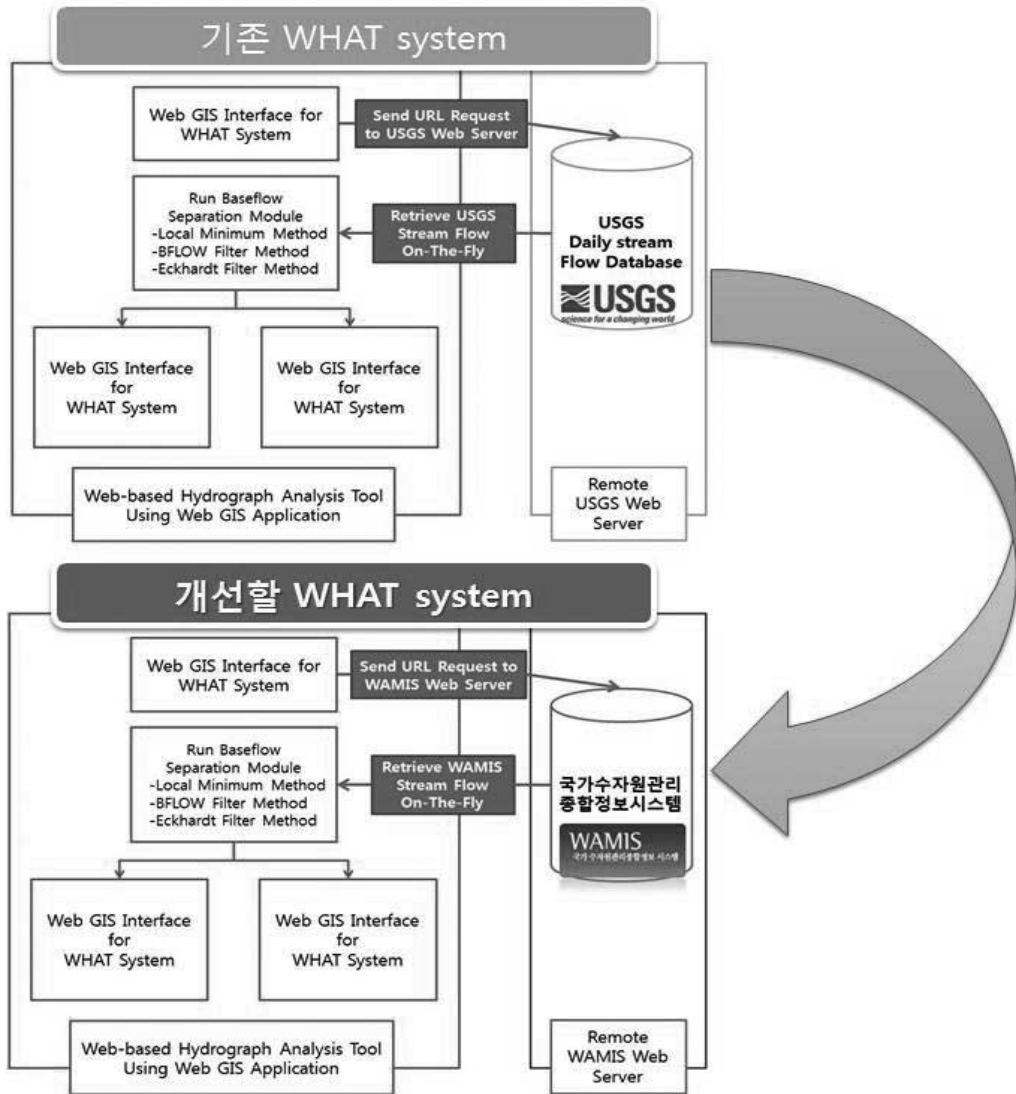


그림 12. 현재 WHAT system과 향후 개발 할 WHAT system의 모식도

4. 향후 확대 개발 방향

▷ 현재 미국 48개주 전역에 걸쳐 구축된 WHAT Web GIS 시스템은 인터넷상에 존재하는 데이터를 XML 자료 형태를 통해서 서로 공유할 수 있도록 구축되어 있기 때문에 우리나라 수자원 종합 시스템(WAMIS)에서 관리하고 있는 전국 유량 관측지점 자료와 WHAT 시스템이 연계한다

면 지역의 기저유출 특성 및 수문/비점연구에 널리 활용될 수 있으리라 판단됨(그림 12).

▷ 현재 개발된 XML 모듈을 확대/이용한다면 WHAT 시스템 결과를 다양한 수문 및 수질 모형의 입력자료로 바로 활용할 수 있기 때문에 그 활용성은 매우 클 것으로 사료되며 따라서 이와 관련된 연구가 필요하다 판단됨.

▷ SWAT 모형의 지하수 관련 인자인 Alpha



factor 산정을 위한 Web GIS 기반 SWAT-BFlow 시스템이 개발되어 (그림 13) 활용중에 있으며, 현재 이러한 기능과 다양한 기저유출 분리 모듈을 하나의 인터페이스에서 구현하기 위한 통합 시스템 개발에 관한 연구가 진행중에 있음.

▷ 소개된 WHAT 시스템은 XML과 Google Map 기반 인터페이스를 채택했기 때문에 미국, 한국 뿐만 아니라 전 세계 어느 곳의 자료를 이용하여 직접유출/기저유출 분리에 활용될 수 있을 것임

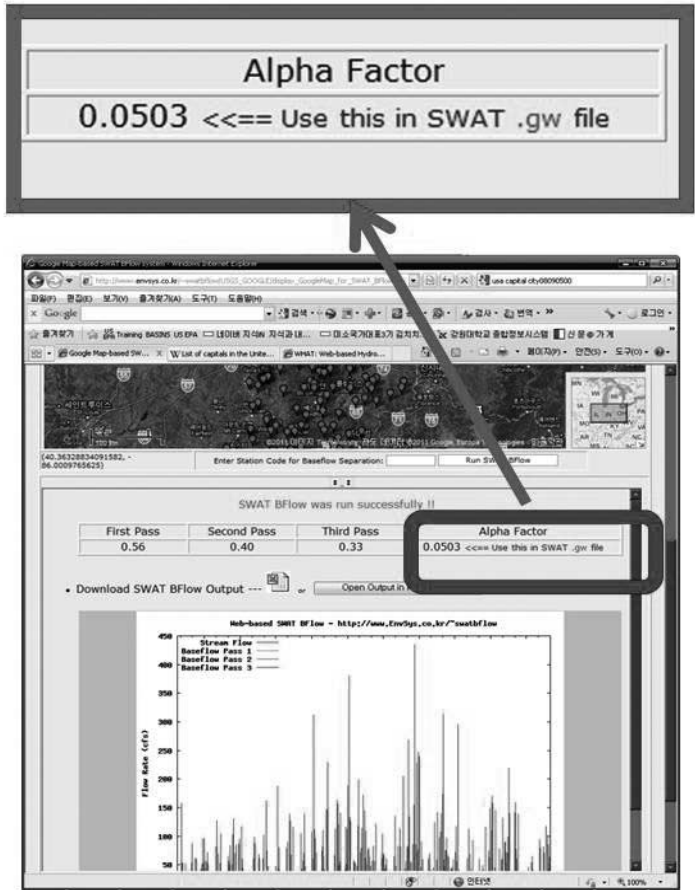


그림 13. SWAT 모형의 지하수 관련 인자인 Alpha factor 산정 모듈

참고문헌

1. 윤용남, 2009. 수문학(기초와 응용). 청문각.
2. 주상욱, 박윤식, 김종건, 허성구, 김기성, 최중대, 임경재. 2007. WHAT 시스템을 이용한 정확한 기저유출 분리를 위한 BFI_{max} 값 산정. 강원대학교 농업과학연구, 18(0): 155-162.
3. Anderson, M. G. and Burt, T. P. 1980. Interpretation of recession flow. Journal of Hydrology, 46: 89-101.
4. Eckhardt, K. 2005. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. Hydrological Processes 19(2): 507-515.
5. Holland, J. H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI 183 pp.



6. Lim, K. J., Engel., B. A., Tang, Z., Choi, J., Kim. K., Muthukrishnan, S. and Tripathy, D. 2005. Automated Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool, WHAT. *Journal of the American Water Recourse Association*, 41(6): 1407-1416.
7. Lim, K. J., Park, Y. S., Kim, J. G., Shin, Y. C., Kim, N. W., Kim, S. J., Jeon, J. H. and Engel, B. A. 2010. Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and model application. *Journal of Computer and Geoscience*, 36(7): 936-944.
8. Lyne, V. D. and Hollick, M. 1979. Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. In: *Hydro. and Water Resour. Symp.* Institution of Engineers Australia, Perth, Australia, pp. 89-92.
9. Sloto, R. A. and Crouse, M. Y., 1996. HYSEP: a computer program for stream flow hydrograph separation and analysis. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 96-4040, Reston, VA, 46 pp.
10. Rutledge, A. T. 1998. Computer programs for describing the recession of groundwater recharge and for estimating mean groundwater recharge and discharge from stream records - Update. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 98 4148, pp. 44.