

하천유역에서의 기저유출 분석을 통한 총질소 하천오염부하량 연구

최운호 · 금동혁* · 류지철 · 정영훈* · 김용석 · 전지홍** · 김기성* · 임경재*†

국립환경과학원 유역총량연구과

*강원대학교 지역건설공학과

**안동대학교 환경공학과

A Study of Total Nitrogen Pollutant Load through Baseflow Analysis at the Watershed

Youn Ho Choi · Donghuyk Kum* · Jichul Ryu · Younghun Jung* · Yong Seok Kim ·
Ji Hong Jeon** · Ki Sung Kim* · Kyoung Jae Lim*†

Department of Water Environment Research, National Institute of Environmental Research

*Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

**Department of Environmental Engineering, Aandong National University

(Received 29 April 2014, Revised 20 January 2015, Accepted 21 January 2015)

Abstract

It has been well known that it is not easy to quantify pollutant loads driven by non-point source pollution due to various factors affecting generation and transport mechanism of it. Especially pollutant loads through baseflow have been investigated by limited number of researchers. Thus in this study, the Web-based WAPLE (WHAT-Pollutant Load Estimation) system was developed and applied at study watersheds to quantify baseflow contribution of pollutant. In YbB watershed, baseflow contribution with WWTP discharge is responsible for 49.5% of total pollutant loads at the watershed. Among these, pollutant loads through baseflow (excluding any WWTP discharge) is responsible for 61.7% of it. In GbA watershed, it was found that 58.4% is contributed by baseflow with WWTP discharge 2.9% and 97.1% is by baseflow. For NbB watershed (without WWTP discharge), 52.3% of pollutant load is transported through baseflow. As shown in this study, it was found that over 50.0% of TN (Total Nitrogen) pollutant loads are contributed by non-direct runoff. Thus pollutant loads contributed by baseflow and WWTP discharge as well as direct runoff contribution should be quantified to develop and implement watershed-specific Best Management Practices during dry period.

Key words : Baseflow, Non-Point Source, TN (Total Nitrogen) Pollutant Loads, WAPLE

1. Introduction

우리나라는 기후 특성상 풍수기에는 지표유출에 의한 오염물질 유입이 많지만 건기 시에 대부분 오염물질은 기저유출을 통해 발생한다. 일반적으로 기저유출에 의한 오염물질의 유입은 넓은 면적을 따라 연중 내내 유입되어 하천의 기본수질에 지속적인 영향을 미치게 된다(Choi et al., 2014; Jang et al., 2011). Choi et al. (2014)은 4대강 수계의 기저유출량이 강우 및 유역 특성별로 49~57%로 평균 54% 이상 발생하는 것으로 나타난다고 하였다. 유럽, 캐나다, 호주 등에서는 배경수질을 조사하여 관리하거나 하천변 지하수에 대한 기준을 별도로 설정하는 등 기저유출에 의한 유입을 하천 유역특성에 맞게 관리하기 위해 노력을 기울이고 있다(Jang et al., 2011; Schilling and Zhang, 2004). USGS

(2002)는 미국 내 148개 지역의 기저유출에 의한 질산성 질소 부하율을 산정하고 약 40% 가량의 지역에서 기저유출의 부하율이 50%가 넘는다고 발표한다 있다. 그리고 Kim and Lee (2009)은 갑천 유역의 질산성 질소 기저유출 부하율이 약 59%에 달한다고 발표하였으며, Shin et al. (2005)은 강원도 월곡리 하천의 질산성 질소와 총질소의 기저유출에 의한 오염부하는 전체 오염부하의 각 57%에 달하며 총인의 오염부하는 30%에 달한다는 연구결과를 발표한 바 있다. 기저유출은 하천의 질소부하의 이동기작 메커니즘으로써 질소가 하천에 유입되기 전 질소부하를 차단하고 줄이기 위해서는 기저유출에 의한 질소부하의 시간에 따른 변동과 양의 정량화가 필요하다(Choi et al., 2006; Schilling and Zhang, 2004). 하천유역에서 하천 수체로의 오염물질 유입 거동을 이해하기 위해서는 하천이나 강에서의 총유출량에서 직접유출과 기저유출을 분리하는 과정이 필요한 것으로 생각된다. 현재 우리나라의 수질오염총량제도는 유역에서의 오염물질을 관리하기 위한 것이기 때문에 유역 내

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

오염물질의 거동에 대한 이해가 필요하다. 또한 오염물질의 거동 등은 강우 특성뿐만 아니라, 직접유출 및 기저유출과 점오염원 시설인 환경기초시설에 따라 달라질 수 있기 때문이다(Choi et al., 2014).

국내에서는 유역의 강우-유출 및 오염부하 특성 파악, 비점오염원 발생 및 이동에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 기저유출량에 의한 오염부하를 정량적으로 평가한 연구들은 아직까지 미흡한 실정이라 볼 수 있다. Kum et al. (2013)에 의하면 유역에서 발생하는 비점오염원이 하천으로 유입되는 경우는 크게 직접유출과 기저유출을 통해서 하천에 유입되고 있기 때문에 환경부에서 제시하고 있는 원단위나 EMC (Event Mean Concentration) 자료는 주로 직접유출에 의한 모니터링 자료를 활용하여 산정된 값이기 때문에 기저유출로 인한 오염부하량을 평가하는데 한계가 있다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 효율적인 하천유역을 관리하기 위해서는 지표수뿐만 아니라 기저유출에 대한 관리가 필요하다고 판단하였다. 이에 본 연구의 목적은 환경부에서 8일 간격으로 측정하고 있는 하천유량 및 수질 자료를 이용하여 하천으로 유입되는 오염부하를 직접유출량, 기저유출량, 그리고 점오염원 방류량으로 구분하여 그 특성을 평가하고자 하였다. 첫 번째는 환경부에서 8일 간격으로 실측하고 있는 유량자료와 국토부 일유량 자료를 수집하여 기저유출량을 분석하였고, 두 번째는 일일유량 및 환경부 8일 간격 실측 수질을 이용하여 하천 오염부하를 산정하는 시스템을 개발하고, 직접유출량과 기저유출량에 의한 오염부하를 산정하였다. 세 번째는 이를 바탕으로 하천 오염부하 중 직접유출량 오염부하를 제외한 나머지 오염부하 중에서 하수처리장 방류량 및 기저유출량 오염부하를 분리하여 하천 오염부하를 정량화하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 연구 대상 유역

본 연구에서는 낙동강 유역의 Nakbon B (NbB), 영산강 유역의 Yeongbon B (YbB), 금강 유역의 Geumbon A (GbA) 수질오염총량단위유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 선정기준은 기저유출량 및 건기 시 유역 내 하수처리장의 시설용량이 큰 점오염원 배출량이 하천 수체에 미치는 영향이 클 것으로 예상되는 YbB 유역, 하수처리장의 시설용량이 상대적으로 작은 GbA 유역, 유역내 하수처리장이 없는 즉 점오염원 시설에 의한 배출량이 없는 NbB 유역을 대상으로 하였다.

YbB는 유역면적이 528.0 km²이고, 광주광역시 유역의 72%를 차지하고 있다. 전체 오염부하의 대부분이 생활계와 토지계가 차지하며, 전형적인 도시지역이지만 산지(34.0%) 및 농경지(37.2%) 비율도 비교적 높은 유역이다(Table 1). 그리고 유역 내 점오염원 배출시설로는 광주 제1·2하수처리장(시설용량 720,000 m³/일)이 있다(NIER, 2011c). GbA는 유역면적이 297.0 km²이고, 장수군이 유역의 98%를 차지하고 있다. 전체 오염부하의 대부분이 축산계와 토지계가 차지하며, 전형적인 농촌지역으로 산지(63.5%) 및 농경지(25.6%) 비율이 매우 높다(Table 1). 그리고 유역 내 점오염원 배출시설로 장수하수처리장(시설용량 2,000 m³/일)이 위치하고 있다(NIER, 2011b). NbB는 유역면적이 950.0 km²이고, 봉화군이 유역의 92%를 차지하고 있다. 전체 오염부하의 대부분이 생활계와 토지계가 차지하며, 전형적인 농촌 지역이면서 산지(86.9%) 및 농경지(10.4%) 비율이 높은 유역이다(NIER, 2011a).

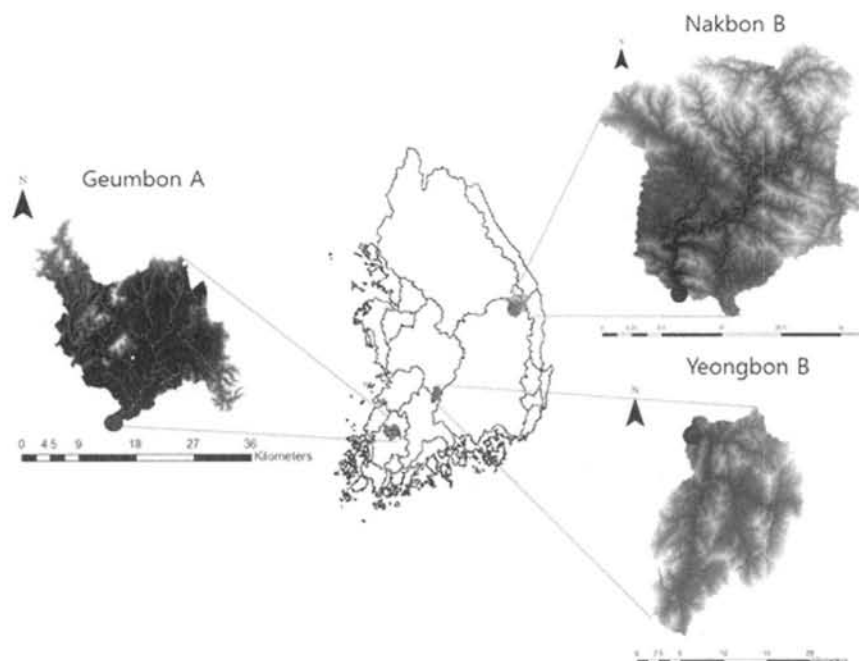


Fig. 1. Study Watershed.

Table 1. Landuse characteristics in study area

Unit watershed	Area (km ²) Share (%)	Forest	Agriculture	Urban	Pasture	Barren	Water	Wetland	Total
YbB	Area	179.5	196.2	105.9	20.8	11.6	12.0	2.0	528
	Share	34.0	37.2	20.0	3.9	2.2	2.3	0.4	100
GbA	Area	188.3	76.0	8.5	16.9	3.6	2.3	1.0	297
	Share	63.5	25.6	2.9	5.7	1.2	0.8	0.3	100
NbB	Area	824.8	98.9	9.1	3.1	3.8	6.2	3.5	950
	Share	86.9	10.4	1.0	0.3	0.3	0.7	0.4	100

2.2. 기저유출 분리 및 오염부하 산정을 위한 일일 유량 산정

유역 내 기저유출에 의한 오염부하를 산정하기 위해서는 일일유량 자료가 필요하다. 그러나 모든 하천이나 유역에서 일일 유량 측정이 이루어지지 않고 있다. 환경부에서도 총량 측정망 및 지류 측정망에서 8일 간격으로 유량과 수질을 측정하고 있으나 8일 간격 유량자료를 일일유량으로 확장하는 작업이 필요하다. 일일유량 확장방법에는 비유량법, 회귀식, 수문모형 등을 이용한 방법이 있다(Mandal and Cunnane, 2009; U.S.EPA, 2007; Zampella et. al., 2007). 미국 지질조사국(USGS)에서는 미계측 하천에서의 유량을 추정하기 위해 인근 하천의 유량 자료를 활용한 비유량법으로도 일일유량을 산정하고 있다(Ries and Friesz, 2000; U.S.EPA, 2007). 국내에서도 Cho et al. (2007)은 미계측 유역에 지역회귀기법 등을 국내에 적용하여 제시한 바 있지만, 이러한 비유량법은 유역의 강우유출 특성을 반영하지 못하는 단점이 있으며, 수문학적 반응 특성이 다른 유역에서의 일일유출량을 산정하는데 한계가 있다. 또한 Kim et al. (2005)은 모델링 기법을 이용하여 유량자료가 없거나 부족한 미계측지역의 유황곡선을 작성하였다. 그러나 이러한 방법은 모델링 구축 등으로 인하여 전문성 및 시간과 비용이 많이 든다는 어려운 점이 있다.

이에 본 연구에서는 환경부에서 8일 간격으로 제공하고 있는 유량자료와 국토부 일유량자료를 이용하였고, NIER (2012)과 Park and Oh (2012)의 회귀식 방법을 이용하여 일일유량으로 확장하였다. 또한 대상유역 내 국토부 하천유량을 연계지점을 선정하여 최적지점을 결정하였으며, 일일유량 확장에 대한 정확성을 파악하기 위해 결정계수(R^2)와 유효지수(NSE) 및 분산도를 산정하여 확인하였다.

2.2.1. 환경부와 국토부 유량측정 지점간의 연계성 조사

연계지점 선정은 환경부 유량-수질측정지점과 국토부에서 운영하는 유량관측지점의 하천유량 측정상태를 검토하여 연관성을 조사 분석하였다(Fig. 2). 첫 번째는 대상유역에 대해 5년간(2006~2010년) 하천유량 측정망 운영상태, 결측일수, 제로측정일수 및 고정측정일수 등의 측정상태를 검토하였다(C-1 in Fig. 2). 두 번째는 두 측정망 간의 관측날짜가 일치하는 관측회수 분석, 상관성 분석, 검정통계량에 의한 유의확률과 NSE 및 분산도를 산정하여 유량측정 자료의 유의성 검정이 유의수준과 NSE의 임계점(NSE>0.8)에 부합하면 신뢰도가 확보된 것으로 보고 유량측정 자료를 이용하였다(C-2 in Fig. 2). 세 번째는 두 측정지점간의 유량자료의 연관성이 높은 지점을 최적 지점으로 선정하였다.

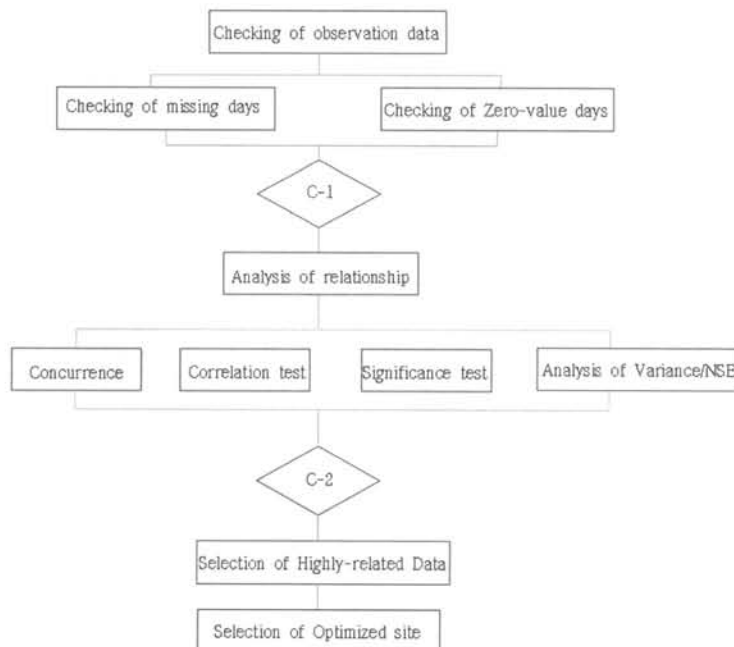


Fig. 2. The procedure for the selection of stream flow reference sites (Park and Oh, 2013).

2.2.2. 일일유량 산정 방법

환경부 유량지점과 국토부 유량지점간의 연계지점을 결정하고 환경부 8일 유량과 국토부의 일유량 자료 사이의 회귀분석을 통하여 환경부 유량지점의 일일유량을 산정하였다. 여기서 회귀분석은 국토부의 일유량 자료에서 환경부 8일 간격에 상응하는 자료를 선별한 후 수행하였다. 이를 위해 환경부 물환경정보시스템에서 제공하는 8일 간격 유량자료와 국토부 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 하천 일유량 자료를 이용하였다. 그리고 8일 간격의 유량자료를 일일유량으로 산정하기 위해서 단순 선형회귀식(식 (1))을 사용하였다(Park and Oh, 2012).

$$Y = aX + b \tag{1}$$

여기서 Y는 연계지점 일일유량 자료, X는 국토부 일일유량 자료이다.

다음 Fig. 3과 같은 방법으로 국토부(Ministry of Land Infrastructure and Transport, MOLIT) 유량 자료와 환경부(Ministry of Environment, MOE) 유량 자료를 이용하여 일일유량으로 확장 산정하였다.

또한, 본 연구에서는 상관성은 높으나 일일유량 확장에 따른 오차요인을 분석하기 위해 일일유량으로 확장한 유량 자료와 8일 간격 실측유량자료를 도식화하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

2.2.3. 일일유량 자료의 정확성 평가

본 연구에서는 확장하여 산정된 일일유량 자료에 대해서 결과의 정확성을 평가하기 위해 결정계수(R^2)를 분석하였다. 또한 결과의 정확성을 판가름하기 위해서 유효지수(Nash-sutcliffe model efficiency coefficient: NSE)를 이용하여 평가하였다. R^2 와 NSE는 1에 가까울수록 모형의 예측

Table 2. Criteria for evaluating model performance

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE	< 0.6	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	> 0.80

치가 실측치를 잘 모의하는 것을 의미한다. NSE 값은 다음의 식 (2)로 표현할 수 있다(Nash and Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{2}$$

여기서, O_i 는 시간 i 에서의 관측값, P_i 는 시간 i 에서의 예측값, \bar{O} 는 관측값(실측값)의 평균값을 의미한다.

Ramanarayanan et al. (1997) 적응성 평가에서 R^2 가 0.5 이상이고, NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제시하였으며 Donigian (2000) 제시한 일반적인 모형의 효율의 범위와 신뢰구간은 Table 2와 같다.

2.3. 하천 오염부하 평가 시스템 개발 및 적용

2.3.1. 직접유출 및 기저유출 분리

기저유출 분리와 하천 오염부하 평가 시스템 개발 및 적용은 다음 Fig. 5와 같은 방법으로 산정하였다. 직접 및 기저유출 오염부하를 평가하기 위해서는 확장한 하천 일일유량 자료와 환경부 8일 간격의 수질 자료가 필요하다. 그리고 하천의 유량은 크게 직접유출량 및 기저유출량, 하수처리장 같은 점오염원 방류량으로 하천이 이루어지기 때문에 대도시의 경우 건기 시 하천 유량의 상당부분이 하수처리장의 방류량이 차지하기 때문에 기저유출량 산정 시 고려하여야 한다. 이를 위해 YbB와 GbA 유역에 있는 5년간(2006~2010년)

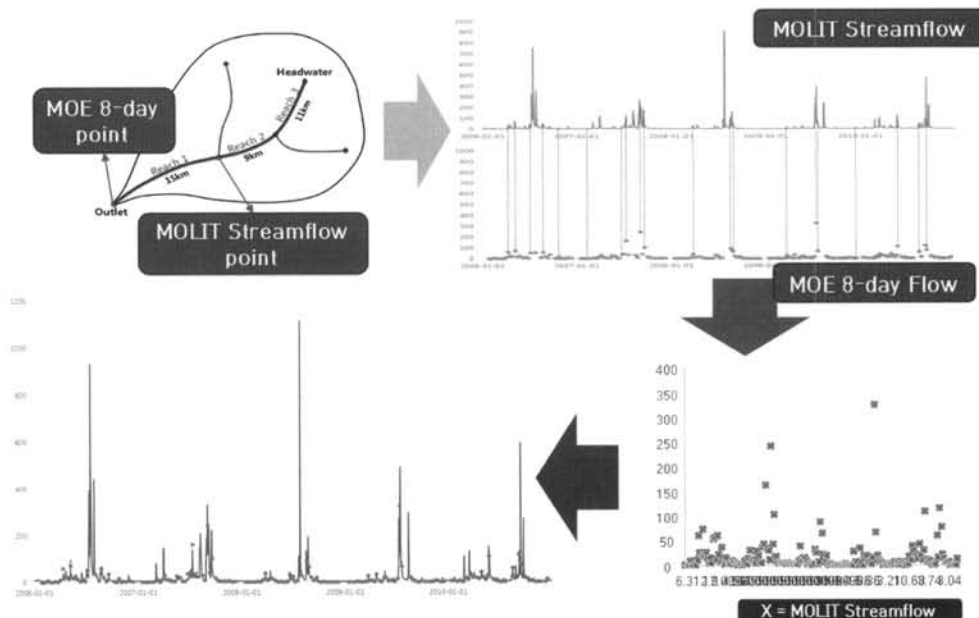


Fig. 3. The procedure to calculation daily data from 8-day interval flow data at stream flow monitoring network.

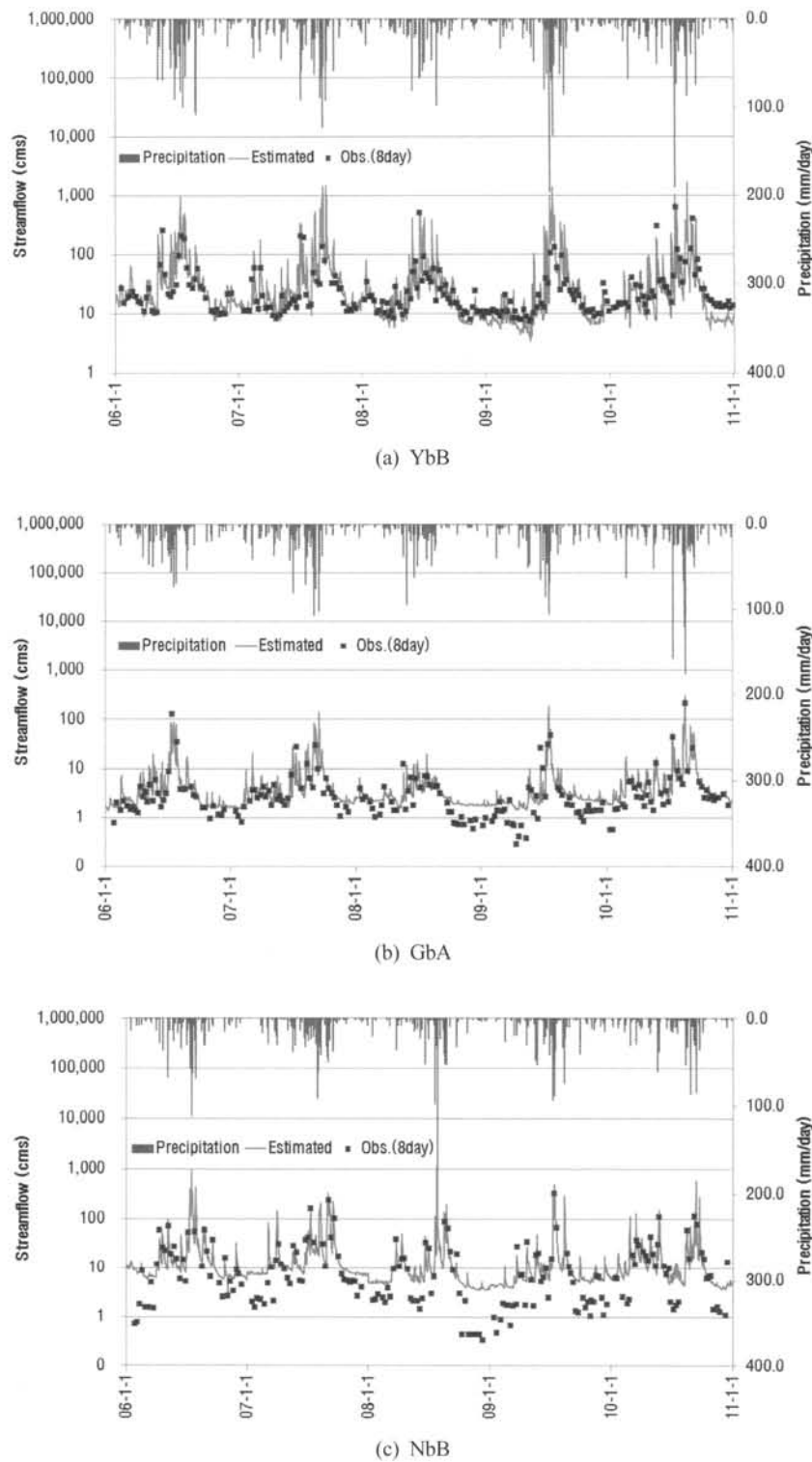


Fig. 4. Estimated hydrograph and observed flow data at three unit watersheds (2006-2010).

의 하수처리장 방류량 자료를 수집하였다.

직접유출 및 기저유출 분리에서 기존 지하수 감수곡선법 등은 장기유출모의에 이용하기에는 효율적이 못할 뿐만 아니라 분석을 수행하는 사람에 따라서 그 결과에 많은 차이가 있을 수 있다(Lim et al., 2005). 이에 주관적인 요소를 배제하도록 HYSEP (Hydrograph separation program) (Sloto and Crouse, 1996), BFLOW 필터(Arnold and Allen, 1999;

Lyne and Hollick, 1979) 등 많은 방법 및 모형들이 개발되었다. 그러나 HYSEP은 프로그램에 필요한 입력자료 및 실행에 있어 많은 어려움이 있으며, 디지털 필터 기반의 BFLOW 필터는 유역내 대수층 특성을 전혀 고려하지 않는 단점이 있다. 이에 Eckhardt (2005)는 유역 내 대수층 특성을 고려하여 기저유출을 분리하는 모듈을 제안하였고, 기저유출 분리시 사용되는 BFI_{max} (Base Flow Index Max) 값 산

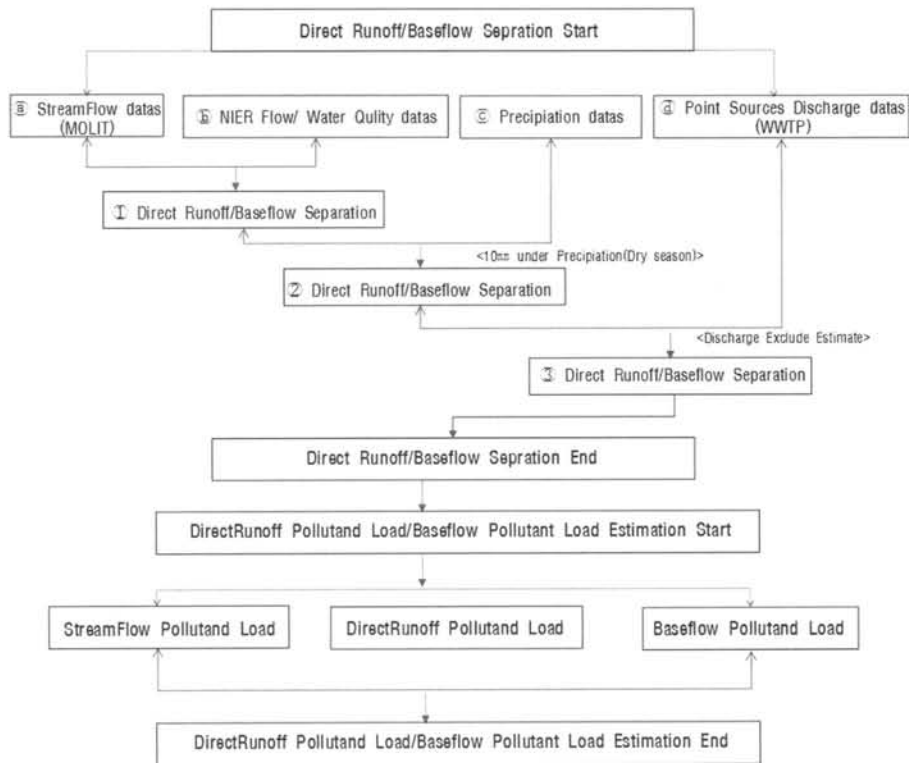


Fig. 5. The procedure for calculation of baseflow separation and pollutant load.

Table 3. Stream flow gauging stations and precipitation stations for each unit watershed

Unit Watershed	Gauging station	
	Stream flow	Precipitation
(YbB)	Bondong	Gwangju
(GbA)	Cheoncheon	Jangsu
(NbB)	Socheon	Bonghwa

정에 있어 주관적인 요소를 배제하기 위하여 대표 대수층 별로 BFI_{max} 값을 제안하였다(Table 3).

그리고 Lim et al. (2005)은 장기간의 유출량 자료를 이용하여 객관적인 직접/기저유출 분리에 활용될 수 있도록 Eckhardt 필터를 이용하여 쉽게 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있는 Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) 시스템을 개발하였다. 최근 들어 이 WHAT 시스템을 확장하여 USGS HYSEP과 USGS PART 모듈을 추가한 EX-WHAT 시스템이 개발되어 다양한 수문 및 비점오염 평가에 활용되고 있다(Kum et al., 2013).

여기서 사용되는 Eckhardt 필터 방법을 이용한 직접/기저유출 분리는 단순히 유량 자료만을 이용하여 직접유출과 기저유출량을 분리하기 때문에, 비가 내리지 않는 시기에 직접유출량이 발생한다고 분석하는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 강우가 10mm 이하로 발생할 경우 직접유출량보다는 기저유출량 형태로 하천에 유입된다고 가정하였다. 강수량 자료의 경우 연구 대상유역인 YbB에 위치하고 있는 광주기상관측소지점, GbA에 위치하고 있는 장수기상관측지점, NbB에 위치하고 있는 봉화기상

관측지점에 대해서 5년간 (2006~2010년)의 강수량 자료를 수집하였다(Table 3).

본 연구에서는 직접유출량 및 기저유출량 분리시 Table 4와 같이 Eckhardt (2005)가 권장하고 있는 BFI_{max} 값을 적용하였다. 여기에서 BFI_{max} 값 0.80은 항시 흐름이 있는 다공성 대수층인 경우, BFI_{max} 값 0.50은 순간 흐름이 있는 다공성 대수층인 경우, 그리고 BFI_{max} 값 0.25는 항시 흐름이 있는 암반대수층인 경우 이용하도록 제안한바 있다.

Table 4. BFI_{max} value characteristics of the aquifer

Aquifer type of watershed	BFI _{max} value
Perennial streams with porous aquifers	0.80
Ephemeral streams with porous aquifers	0.50
Perennial stream with hard rock aquifers	0.25

2.3.2. 오염부하 평가 시스템 개발 및 적용

본 연구에서는 4대강 물환경연구소 및 국내 주요 대학 및 기업 등에서 오염부하량 산정 및 비점원단위 산정을 위해 이용하고 있는 NI(Numeric Integration)방법을 통해 오염부하 산정 모듈을 개발하였다. 본 연구에 사용된 NI 방법의 식 (1)은 다음과 같다.

$$Load = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \tag{1}$$

여기서 c_i 는 i 번째 샘플의 농도이며, q_i 는 i 번째 유량이다. 그리고 t_i 는 i 번째 샘플로서 표현되는 시간 구간으로

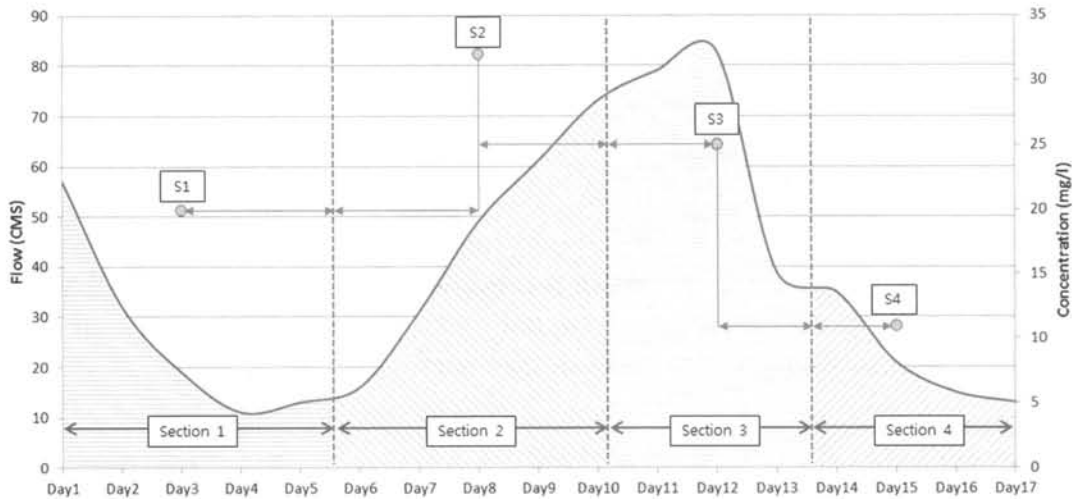


Fig. 6. Estimation of pollutant loading using the NI method.

$$\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1}) \text{이다.}$$

NI 방법을 통한 하천 오염부하량 산정은 임의의 지점에서 유량과 실측 수질 농도를 이용하여 NI 방법을 통해 오염부하량을 산정할 때, 전체 유량 구간을 수질 샘플링 시점을 기준으로 분리한 경우이다. NI 방법에서는 오염부하량 산정 시 구간 구분은 수질 샘플링 이전 및 이후 기간 사이의 중간지점을 기점으로 구분하며 대표농도는 해당 구간의 수질 샘플링 농도를 이용하여 산정된다.

본 연구에서 직접유출량 및 기저유출량 분리 시스템인 WHAT 시스템에 활용된 Eckhardt 필터 방법과 오염부하량 산정 방법인 NI 방법, 프로그래밍 언어인 Common Gateway Interface (CGI)와 자바스크립트 등을 이용하여 웹상에서 하천 오염부하량을 산정할 수 있는 WAPLE (WHAT-Pollutant Load Estimation) system을 구축하였다.

여기에서 NI 방법은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 각 구간별(section1-section4) 대표농도(s1-s4)는 실측 샘플링 이전 및 이후 기간 사이의 대표농도로 그 해당 실측 농도가 이용되어 오염부하가 산정된다. 따라서 WAPLE 시스템은 유량 및 수질의 관측빈도에 따라 오염부하의 정확도에 영향을 받으나 기존의 다른 방법에 비해 적용성이 쉽고, 재현성이 높다는 장점을 가지고 있다.

이 WAPLE 시스템을 이용하여 3곳의 연구 대상 유역에 대해 총 오염부하를 산정하였다. 그 중 직접유출량 오염부하, 하수처리장 방류수에 의한 오염부하, 그리고 기저유출량에 의한 오염부하를 산정하였다. 여기에서 기저유출량 오염부하는 총 오염부하에서 직접유출량 오염부하와 하수처리장 방류부하를 제외한 부하를 말한다.

3. Results and Discussion

3.1. 기저유출 분리 및 오염부하 산정을 위한 일일 유량 산정

본 연구에서는 회귀식 방법(NIER, 2012; Park and Oh, 2012)을 이용하여 대상 유역인 YbB, GbA, NbB 유역의 각 말단부에서 측정하고 있는 8일 간격 유량 자료를 365일 연속유량으로 확장하여 하천 일일유량을 산정하였다(Table 5, Fig. 7). 대상유역과 그 말단부의 자료 확장에 사용된 연속유량계측 지점인 연계지점, 결정계수, 평균오차 및 회귀식을 정리한 결과 두 자료간 상관계수는 대상유역 모두 R^2 0.9 이상이고, NSE 지수는 0.9 이상으로 나타났다. 또한 세 지점 모두 회귀 분석 적합성 평가 결과 결정계수 0.5 이상과 평균오차(Mean Error, ME) 50% 이하로 나타나 두 변수 간에 상관성이 높은 것으로 판단된다.

그리고 일일유량 예측치와 실측치와의 적합성 평가 결과는 Fig. 8과 같다. 분산도에서도 대체적으로 1:1선에 잘 밀집해 있는 것으로 나타났다. 결정계수는 0.90으로 매우 높아 예측 결과에 대해 적용성이 있는 것으로 나타났다.

또한, 2장 연구방법에서 Fig. 4와 같이 상관성은 높으나 일일유량 산정에 따른 오차요인을 분석하기 위해 일일유량으로 산정한 유량자료와 8일 간격 실측 유량자료를 분석한 결과 상관성은 높아도 국토부의 관측된 유량자료의 경우 일정기간 동안 동일한 값으로 지속되는 경우와 결측치가 국토부 자료를 이용하여 환경부 유량자료를 예측하는 데에 적지 않은 영향을 끼친 것으로 생각된다. 그리고 하천유량 측정지점이 해당 유역 내에 위치하여 유역특성이 유사하고

Table 5. Result of regression analysis between stream and unit watershed flow data (2006-2010)

Unit Watershed	Reference site	Coefficient of Determination (R^2)	NSE	Mean error (ME%)	Regression equation
YbB	Bondong	0.92	0.98	24.5	Simple Linear
GbA	Cheoncheon	0.94	0.99	49.2	Simple Linear
NbB	Socheon	0.93	0.93	10.3	Simple Linear

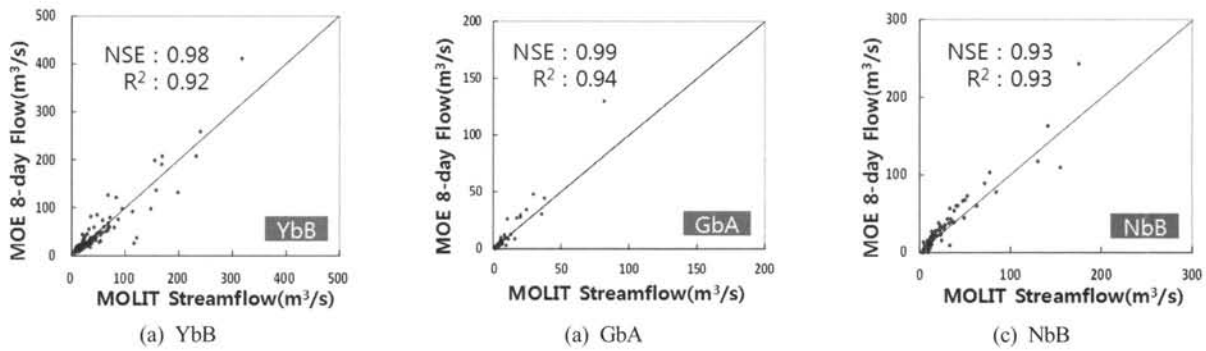


Fig. 7. Application of regression equation to unite watersheds (2006-2010).

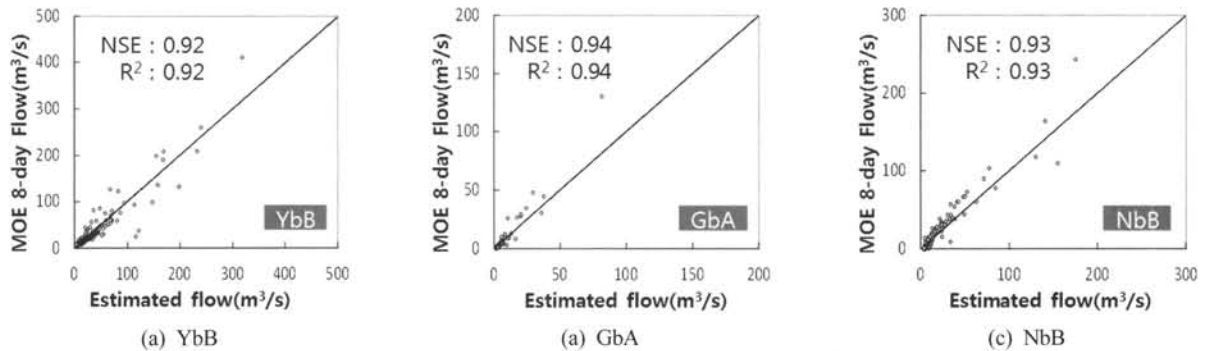


Fig. 8. Analysis of variation between observed and simulated stream flow unit watersheds (2006-2010).

하천 일일유량 측정상태가 양호한 유역에서는 정확도가 다른 유역에 비해 증가하였다. NbB 지점의 경우 저유량이나 갈수기 동안 고유량에 비해 적지 않은 오차를 보였는데, 이는 국토부 일일유량 자료의 경우 수위-유량 곡선에 대한 점검 및 실측 자료에 대한 집중적인 검토가 필요한 것으로 생각된다.

3.2. 하천 오염부하 평가 시스템 개발 및 적용

본 연구에서는 Eckhardt 필터 방법과 오염부하 산정 방법인 NI 방법을 활용하여 오염부하 평가 시스템을 개발 구축하여 대상유역에 적용 기저유출량 형태로 하천 수체로 유입되는 오염부하를 정량화 하였다.

Eckhardt 필터 방법과 오염부하 산정 방법인 NI 방법을 활용하여 웹상에서 구현되도록 WAPLE (WHAT-Pollutant Load Estimation) system을 구축(www.EnvSys.co.kr/~waple) 하였다(Fig. 9). 이 WAPLE 시스템은 직접/기저 유출 분리뿐만 아니라 직접유출량과 기저유출량에 대한 오염부하도 분석되어 유출사상에 따른 오염부하를 정량적으로 평가할 수 있다. 또한, (d)에서와 같이 EMC 산정을 통해 원단위 산정 시 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 연구 방법에서도 언급한 바와 같이 이 시스템은 CGI 프로그램 언어/자바스크립트 등으로 구축하였다(Fig. 9).

이 WAPLE 시스템은 직접 및 기저유출량 분리와 오염부하 산정을 위한 일별 유량 및 수질 자료를 입력받으면 (Fig. 9(b)), 결과를 테이블(Fig. 9(c))과 그래프(Fig. 9(d))로 제공한다.

따라서 본 연구에서는 연구방법에 따라 대상유역에 대해

직접/기저유출량이 아닌 직접/기저/하수처리장 방류량으로 분리하여 산정하였다. 그 결과를 보면 다음과 같다(Table 6).

대상유역인 YbB 유역은 2006년부터 2010년까지의 5년간 기저유출량 기여를 분석한 결과 봄, 늦가을, 겨울철에 기저유출이 46.0%~70.6%로 높게 나타났으며 여름철에 40.7%로 낮게 나타났다. 또한 하천유량에서 직접유출량을 제외하고 나머지 하수처리장 방류량과 기저유출량에 대한 기여율은 각각 31.2%, 68.8%로 나타났다. 그리고 계절별로 보면 겨울철에 37.7%로 가장 낮았으며, 여름철에 80.1%로 기저유출량이 가장 높게 나타났다. 특히, 평·저수기 및 갈수기 하천유량이 기저유출량이라고 볼 때 YbB 유역의 경우는 하천에서의 기저유출량뿐만 아니라 하수처리장 방류량도 미치는 영향이 크기 때문에 유량지속곡선을 작성하여 유황별로 평가하고자 하였다. Fig. 10에서와 같이, 특히 갈수기에 하수처리장 방류량이 하천유량에 미치는 기여율이 매우 큰 것으로 나타나 하천유량에 따라 수질오염에 영향이 있을 것으로 판단된다.

GbA 유역은 2006년부터 2010년까지의 5년간 기저유출량 기여를 분석한 결과 봄, 늦가을, 겨울철에 기저유출이 67.4%~71.7%로 높게 나타났으며 여름철에 49.1%로 가장 낮게 나타났다. 또한 하천유량에서 직접유출량을 제외하고 나머지 하수처리장 방류량과 기저유출량에 대한 기여율은 각각 2.9%와 97.1%로 나타났으며 하수처리장 방류량에 의한 영향보다는 기저유출량에 의한 영향이 큰 것으로 나타나, 유황별로는 평가하지 않았다. NbB 유역은 하수처리장이 없는 유역으로 2006년부터 2010년까지의 5년간 기저유출량 기여율을 분석한 결과 하천유량에서 54.4%가 기저유출량으로

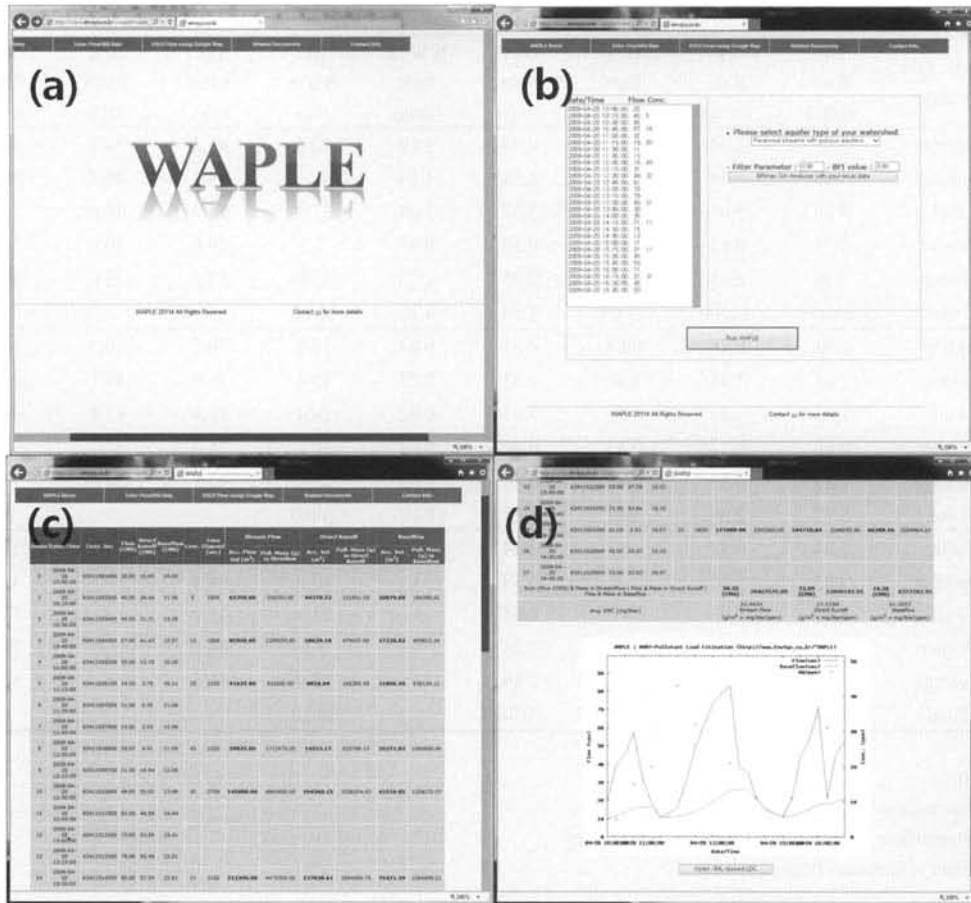


Fig. 9. Pollutant load estimation system using numeric integration and baesflow separation methods. (a) WAPLE Web interface, (b) flow and water quality data interface, (c) directrunoff and baseflow output, (d) directrunoff and baseflow output

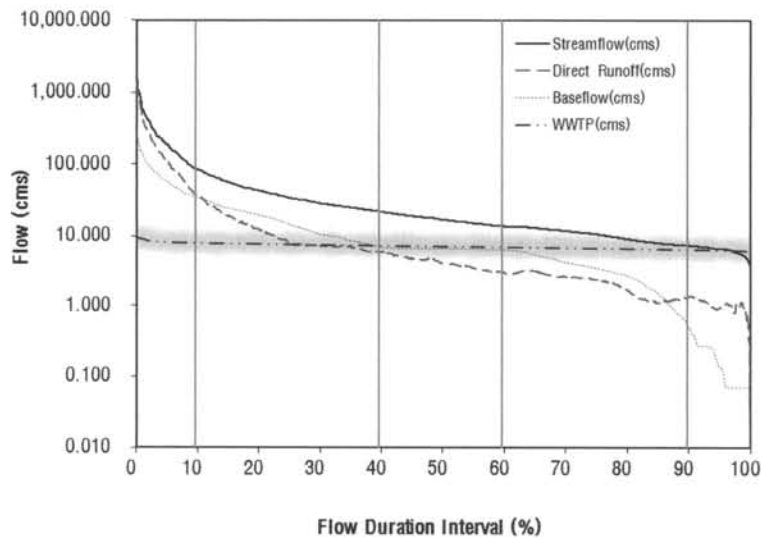


Fig. 10. Flow duration curve streamflow, baseflow, WWTP for YbB (2006~2010).

나타났다. 세 유역에 대한 결과를 볼 때, 하천유량이 적을 때 기저유출량 기여율이 크고 유량이 증가할 때 기저유출량 기여율이 작은 것으로 나타났다. 또한 하수처리장 방류량이 영향이 큰 하천유역에서는 총 유출량을 직접/기저유출량 아닌 직접/기저/하수처리장 방류량으로 분리하여 기저

유출량을 산정 평가하여야 할 것으로 생각된다.

또한 개발된 오염부하 평가 시스템을 이용하여 대상유역에 대해 2006년부터 2010년까지 5년간 T-N 하천오염부하를 산정하였다(Table 7). 대상유역인 YbB 유역의 T-N 오염부하의 경우 하천에서 평균 기저오염부하율은 61.7%로 나

Table 6. Summary of seasonal total streamflow, baseflow, WWTP and baseflow ratio, WWTP ratio from 2006 to 2010

Station	Seasonal Average	SF Rate (cms)	DR Rate (cms)	BF ₀ Rate (cms)	BF ₁ Rate (cms)	WWTP Rate (cms)	SF Ratio (%)	DR Ratio (%)	BF ₀ Ratio (%)	BF ₁ Ratio (%)	WWTP Ratio (%)
YbB	Spring	3.75	1.70	2.05	0.95	1.10	12.8	45.3	54.7	46.4	53.6
	Summer	14.06	8.34	5.72	4.58	1.14	47.9	59.3	40.7	80.1	19.9
	Fall	9.36	5.05	4.31	3.27	1.04	31.9	54.0	46.0	75.8	24.2
	Winter	2.21	0.65	1.56	0.59	0.97	7.5	29.6	70.6	37.7	62.3
	Average	7.34	3.93	3.41	2.35	1.06	25.0	53.6	53.0	68.8	31.2
	Total	29.38	15.74	13.64	9.39	4.25	100.0	-	-	-	-
GbA	Spring	0.91	0.28	0.64	0.61	0.03	15.8	30.7	70.3	96.0	4.0
	Summer	2.85	1.45	1.40	1.38	0.02	49.4	50.9	49.1	98.2	1.8
	Fall	1.41	0.46	0.95	0.93	0.02	24.4	32.4	67.4	97.5	2.5
	Winter	0.60	0.17	0.43	0.40	0.03	10.4	28.3	71.7	93.8	6.2
	Average	1.44	0.59	0.86	0.83	0.03	25.0	40.8	64.6	97.1	2.9
	Total	5.77	2.36	3.42	3.32	0.10	100.0	-	-	-	-
NbB	Spring	3.84	1.40	-	2.44	-	19.4	36.4	-	53.6	-
	Summer	9.63	5.23	-	4.39	-	48.6	54.4	-	45.6	-
	Fall	4.58	1.93	-	2.65	-	23.1	42.1	-	57.9	-
	Winter	1.75	0.47	-	1.28	-	8.8	26.8	-	73.2	-
	Average	4.95	2.26	-	2.69	-	25.0	45.6	-	54.4	-
	Total	19.8	9.03	-	10.76	-	100.0	-	-	-	-

SF: StreamFlow

DR: Direct Runoff

BF₀: BaseFlow (Streamflow - Direct runoff)BF₁: BaseFlow (Streamflow - Direct runoff - WWTP discharge)

WWTP: Waste Water Treatment Plant discharge

Table 7. Seasonal average T-N pollutant loads driven by streamflow and baseflow from 2006 to 2010

Station	Seasonal Average	SF Pollution Mass (kg/day)	DR Pollution Mass (kg/day)	BF Pollution Mass (kg/day)	WWTP Pollution Mass (kg/day)	DF Pollution Ratio (%)	BF Pollution Ratio (%)	WWTP Pollution Ratio (%)
YbB	Spring	2,399.42	1,022.39	557.82	819.22	42.6	40.5	59.5
	Summer	6,530.89	3,673.93	2,278.12	578.85	56.3	79.7	20.3
	Fall	3,913.76	2,210.44	1,157.85	545.47	56.5	68.0	32.0
	Winter	1,979.10	575.50	535.26	868.33	29.1	38.1	61.9
	Average	3,705.79	1,870.56	1,132.26	702.97	50.5	61.7	38.3
GbA	Spring	340.01	102.10	230.60	7.31	30.0	96.9	3.1
	Summer	903.77	484.52	410.61	8.64	53.6	97.9	2.1
	Fall	383.05	122.78	253.05	7.21	32.1	97.2	2.8
	Winter	225.13	61.55	154.87	8.71	27.3	94.7	5.3
	Average	462.99	192.74	262.28	7.97	41.6	97.1	2.9
NbB	Spring	691.46	260.24	431.22	-	37.6	62.4	-
	Summer	1,858.12	1094.74	763.38	-	58.9	41.1	-
	Fall	775.26	326.76	448.50	-	42.1	57.9	-
	Winter	474.58	129.11	345.47	-	27.2	72.8	-
	Average	949.85	452.71	497.14	-	47.7	52.3	-

SFP: StreamFlow Pollution

DRP: Direct Runoff Pollution

BFP: BaseFlow Pollution (= SFP - DRP - WWTP discharge)

WWTP: Waste Water Treatment Plant discharge Pollution

타났으며 계절별 기저오염부하 기여율을 보면 겨울철에 38.1%로 가장 낮은 것으로 나타났다. 그리고 여름철에 68.0%로 가장 높은 것으로 나타났다. GbA 유역의 T-N 오염부하의 경우는 하천에서 평균 기저오염부하율은 97.1%로 나타

났으며 계절별 기저오염부하율을 보면 겨울철에 94.7%로 가장 낮은 것으로 나타났다. NbB 유역의 T-N 오염부하의 경우는 하천에서 평균 기저오염부하율은 52.3%이고, 겨울철에 72.8%로 가장 높았으며 여름철에 41.1%로 가장 낮은

것으로 나타났다.

Table 6과 Table 7에서와 같이 본 연구에서 수행된 연구 결과와 기 수행된 연구 결과를 보면, Shin et al. (2005)은 기저유출량에 대한 연구결과 NO₃-N은 총오염부하의 53.6%가 기저유출량에 의한 오염부하로 직접유출량에 의한 오염부하 보다 다소 높다고 하였으며, 전반적으로 비강우기간인 봄, 늦가을, 겨울철에 기저유출률이 80% 이상 높게 나타나 기저유출량은 비강우기간에 증가하는 것으로 나타난다고 하였다. 그리고 Welderufael and Woyessa (2010)은 Central South Africa의 Modder River Basin에서 1999년부터 2007년까지의 총유출량에 대한 기저유출량에 대한 연구결과 평균 71.0%가 기저유출량형태가 나타난다고 하였다. 이는 본 연구에서 수행한 연구결과와 유사하다고 볼 수 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 하천유역의 일일유출을 산정하여 기저유출량을 산정하고, 하천 오염부하를 산정 평가하기 위해 WAPLE 시스템을 개발하였으며, 이 시스템을 이용하여 하천에 유입되는 직접유출량과 하수처리장 방류량 및 기저유출량에 의한 오염부하를 구분하여 정량화하고자 하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하천유역의 일일유출 자료 산정 결과에서 보듯이 국토부 하천유출량과 환경부 총량유출량 간의 결정계수(R^2) 0.9 이상, NSE 지수는 0.9 이상으로 나타나 연구 대상유역 모두 상관성이 매우 높았다. 그리고 일일유출 예측치와 실측치와의 적합성 평가 결과 분산도에서 대체적으로 1:1 선에 잘 밀집해 있는 것으로 나타났다. 그러나 수위-유출 곡선식에 의해 도출된 국토부의 저수위/갈수량은 관측된 유출자료에 불확실성이 존재할 경우 그 불확실성은 일일유출 예측까지 연장될 수 있다.
- 2) 기저유출량 분석 결과에서 보듯이 YbB유역은 총 하천유출량 중에 46.4%가 하수처리장 방류량을 포함한 기저유출량이고, 방류량을 제외한 기저유출량 비는 68.8%로 나타났다. GbA 유역은 총 하천유출량 중에 59.2%가 방류량을 포함한 기저유출량이며, 방류량을 제외한 기저유출량 비는 97.1%로 나타났다. 하수처리장이 없는 NbB 유역은 하천유출량에서 54.4%가 기저유출량으로 나타났다. 따라서 하천유출량의 50% 이상이 직접유출량이 아닌 것을 확인 할 수 있었다. 또한 결과에서 알 수 있듯이 하수처리장 방류량 등의 인위적 요소가 큰 하천유역에서는 총 유출량을 직접/기저유출량이 아닌 직접/기저/하수처리장 방류량으로 분리하여 기저유출량을 산정 평가하여야 할 것으로 생각된다.
- 3) WAPLE (WHAT-Pollutant Load Estimation) system을 이용하여 산정한 결과 하수처리장 방류량이 큰 YbB유역은 총 오염부하 중에 49.5%가 하수처리장 방류량을 포함한 기저유출량이고, 방류량을 제외한 기저유출량 오염부하 비는 67.1%로 나타났다. 또한 하수처리장 방류량이 작은 GbA 유역은 총 오염부하 중에 58.8%가 방류량

을 포함한 기저유출량이며, 방류량을 제외한 기저유출량 오염부하 비는 97.1%로 나타났다. 그리고 하수처리장 방류량이 없고, 산지 및 농경지 비율이 높은 NbB 유역은 총 오염부하 중에 54.4%가 기저유출량으로 나타났다. 결과에서 알 수 있듯이 전체 하천 오염부하의 52.3% 이상이 직접유출량에 의한 오염부하가 아닌 것을 확인할 수 있었다. 따라서 하수처리장과 같은 인위적인 요인이 큰 하천유역에서는 유역 내 방류수량과 기저유출량 특성에 따라 수질개선 효과가 달리 나타나기 때문에 유역 특성에 따른 관리방안을 위해서는 기저유출량 산정 시 하수처리장 방류량 등의 인위적인 요인을 고려하여야 할 것으로 생각된다.

본 연구와 같이 효율적인 하천유역 수질관리를 위해서는 직접유출량에 의한 오염부하뿐만 아니라 하수처리장 방류량 및 기저유출량에 의한 오염부하도 같이 고려하여야 할 것으로 생각된다. 그리고 향후 본 연구 결과는 직접유출량 위주의 수질관리 방안이 아닌 기저유출량으로 인한 오염부하 제어를 위한 기초자료 및 특성화된 하천유역 수질관리 방안으로서 건기 시 맞춤형 유역수질관리 방안을 제시하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Project(No : RE201402074) “한국형 표토 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Arnold, J. G. and Allen, P. M. (1999). Automated Methods for Estimating Baseflow and Ground Water Recharge from Streamflow Records, *Journal of the American Water Resources Association*, 35, pp. 411-424.

Cho, T. G., Kim, Y. O., and Lee, K. S. (2007). Improving Low Flow Estimation for Ungauged Basins in Korea, *Journal of Korea Water Resources Association*, 40(2), pp. 113-124. [Korean Literature]

Choi, J. D., Shin, Y. C., Lyou, C. W., Chio, Y. H., and Lim, K. J. (2006). Pollutant Load Characteristics by Baseflow in a Small Agricultural Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(2), pp. 244-249. [Korean Literature]

Choi, Y. H., Park, Y. S., Ryu, J. C., Lee, D. J., Kim, Y. S., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2014). Analysis of Baseflow Contribution to Streamflow at Several Flow Stations, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(4), pp. 441-451. [Korean Literature]

Donigian, A. S. (2000). *HSPF Training Workshop Handbook and CD*, Lecture #19, Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., USA.

Eckhardt, K. (2005). How to Construct Recursive Digital Filters

- for Baseflow Separation, *Hydrological Processes*, 19, pp. 507-515.
- Jang, W. S., J. Ryu, J. C., Kang, H. W., Lee, J. W., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2011). Application and Evaluation of the NI, ESTIMATOR, LOADEST to Estimate Efficiently Pollutant Loading from a Stream, *Institute of Agricultural Science Kangwon National University*, 23(1), pp. 1-10. [Korean Literature]
- Kim, G. H. and Lee, H. S. (2009). Impacts of Nitrate in Base Flow Discharge on Surface Water Quality, *Korean Society of Civil Engineers*, 29(1B), pp. 105-109. [Korean Literature]
- Kim, S. D., Lee, K. H., and Kim, H. S. (2005). Low Flow Estimation for River Water Quality Models using a Long-Term Runoff Hydrologic Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 21(6), pp. 575-583. [Korean Literature]
- Kum, D. H., Jang, C. W., Ryu, J. C., Shin, Y. C., Shin, M. H., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2013). Investigation of Baseflow Separation and Nonpoint Source Pollution into Shallow Groundwater, *Proceedings of the 2013 Spring Co-Conference of the Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society on Water Environment*, Korean Society of Wastewater and Korean Society on Water Environment, S-1-2, pp. 1-2. [Korean Literature]
- Lim, K. J., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K., Muthukrishnan, S., and Triphy, D. (2005). Automated Web GIS Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT, *Journal of The American Water Resources Association*, 41, pp. 1406-1407.
- Lyne, V. D. and Hollick, M. (1979). Stochastic Time-variable Rainfall-runoff Modeling, *Proceedings of Hydrology and Water Resources Symposium*, Institution of Engineers Australia, Perth, pp. 89-92.
- Mandal, U. and Cunnane, C. (2009). Low-flow Prediction for Ungauged River Catchments in Ireland, *Irish National Hydrology Seminar 2009*, pp. 33-48.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I, A Discussion of Principles, *Journal of hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2011a). *Estimation Implement Result the 1rd Stage Total Maximum Daily Loads in Nakdong River Basin*, National Institute of Environmental Research, pp. 1-300. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2011b). *Estimation Implement Result the 1rd Stage Total Maximum Daily Loads in Guem River Basin*, National Institute of Environmental Research, pp. 1-300. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2011c). *Estimation Implement Result the 1rd Stage Total Maximum Daily Loads in Yeongsan-Seomjin River Basin*, National Institute of Environmental Research, pp. 1-300. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Development of Long Term Flow Duration Curves for the Management of TMDLs*, NIER-RP2012-220, National Institute of Environmental Research, pp. 1-37. [Korean Literature]
- Park, J. D. and Oh, S. Y. (2012). Contributions to the Impaired Water Bodies by Hydrologic Conditions for the Management of Total Maximum Daily Loads, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(4), pp. 574-581. [Korean Literature]
- Park, J. D. and Oh, S. Y. (2013). Development of Long Term Flow Duration Curves in 4 River Basins for the Management of Total Maximum Daily Loads, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(3), pp. 343-353. [Korean Literature]
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). *Using APEX to ASAE*, International Meeting Minneapolis, MN, pp. 97-2209.
- Ries, K. G. III, and Friesz, P. J. (2000). *Methods for Estimating Low-flow Statistics for Massachusetts Streams*, U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4135, United States Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 1-81.
- Schilling, K. and Zhang, Y. (2004). Baseflow Contribution to Nitrate-nitrogen Export from a Large, Agricultural Watershed, USA, *Journal of Hydrology*, 295, pp. 305-316.
- Sloto, R. a. and Crouse, M. Y. (1996). *HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis*, U.S. Geological Survey Water-resources Investigations Report 96-4040, United States Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 1-54.
- Shin, Y. C., Choi, J. D., Lim, K. J., Shim, H. H., Lyou, C. W., and Shin, M. H. (2005). Nonpoint Source Pollutants Loads Characteristics of Rural Watershed, *Proceedings of the 2005 spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, pp. 579-582. [Korean Literature]
- U. S. Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2007). *An Approach for using Load Duration Curves in the Development of TMDLs*, EPA 841-B-07-006, United States Environmental Protection Agency, Pennsylvania Ave., N. W., Washington, D. C, pp. 1-68.
- U. S. Geological Survey (USGS). (2002). *User Guide for the PULSE Program*, Open-file Report 02-455, United States Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 1-34.
- Welderufael, W. A. and Woyessa, Y. E. (2010). Stream Flow Analysis and Comparison of Baseflow Separation Methods Case Study of the Modder River Basin in Central South Africa, *European Water*, 31, pp. 3-12.
- Zampella, R. A., Procopio, N. A., Lathrop, R. G., and Dow, C. L. (2007). Relationship of Land-use/Land-cover Patterns and Surface-water Quality in the Mullica River Basin, *Journal of the American Water Resources Association*, 43, pp. 594-604.