

수질오염총량관리를 위한 유역모형의 유달 과정 재현방안 연구

황하선 · 이한필* · 이성준 · 안기홍 · 박지형 · 김용석†

국립환경과학원 유역총량과
*(주)이티워터

Study on Representation of Pollutants Delivery Process using Watershed Model

Ha Sun Hwang · Han Pil Rhee* · Sung Jun Lee · Ki Hong Ahn · Ji Hyung Park · Yong Seok Kim†

Watershed and Total Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research
*ETWATERS Inc.

(Received 18 October 2016, Revised 29 November 2016, Accepted 29 November 2016)

Abstract

Implemented since 2004, TPLC (Total Pollution Load Control) is the most powerful water-quality protection program. Recently, uncertainty of prediction using steady state model increased due to changing water environments, and necessity of a dynamic state model, especially the watershed model, gained importance. For application of watershed model on TPLC, it needs to be feasible to adjust the relationship (mass-balance) between discharged loads estimated by technical guidance, and arrived loads based on observed data at the watershed outlet. However, at HSPF, simulation is performed as a semi-distributed model (lumped model) in a sub-basin. Therefore, if the estimated discharged loads from individual pollution source is directly entered as the point source data into the RCHRES module (without delivery ratio), the pollutant load is not reduced properly until it reaches the outlet of the sub-basin. The hypothetic RCHRES generated using the HSPF BMP Reach Toolkit was applied to solve this problem (although this is not the original application of Reach Toolkit). It was observed that the impact of discharged load according to spatial distribution of pollution sources in a sub-basin, could be expressed by multi-segmentation of the hypothetical RCHRES. Thus, the discharged pollutant load could be adjusted easily by modification of the infiltration rate or characteristics of flow control devices.

Key words : BMP Web Toolkit, Delivery ratio, HSPF, TPLC, Watershed modeling

1. Introduction

우리나라에서 시행되고 있는 수질오염총량관리제(이하 총량관리)는 수계구간(이하 단위유역)에 목표수질을 설정하고 목표수질을 달성 및 유지할 수 있는 배출부하량을 할당하여 관리하는 제도로 단위유역 내에서 발생·배출된 오염물질이 목표수질 설정지점까지 도달하는 과정의 해석이 무엇보다 중요하다. 총량관리 목표수질 설정 및 배출부하량의 할당을 위해서는 배출된 오염물질이 단위유역의 특정지점까지 도달하는 과정에서 발생하는 물질수지의 변화에 대한 규명 및 재현이 필요한데 지류구간(소유역)은 유달율을 이용하여 배출부하량과 유달부하량 간의 물질수지를 규명·재현하고 있으며, 본류구간은 수질모형을 이용하여 규명·재현하고 있다(Hwang et al., 2016).

총량관리 초기에는 대부분 하천의 수질이 환경기초시설 방류수 등 점오염원에 많은 영향을 받아 저유량 시기에 수질악화가 두드러졌기 때문에 연간 하천 유량 중 저수량 조건을 총량관리 기준유량으로 정하고 이 유량 조건에서 목표수질을 달성 및 유지할 수 있는 배출부하량을 할당하는 제도가 시행되어왔으며, 이에 정적수질모형이 이용되어 왔다(Hwang et al., 2007; NIER, 2014a). 그러나 최근 하수도 보급률이 92.1%에 달하고(MOE, 2014) 고도처리시설의 확충 등 점오염원 관리는 크게 개선된 반면, 지속적인 개발과 기후변화 및 극한기후 현상으로 인해 비점오염원에 대한 비중은 지속적으로 증가하고 있어(Jeon et al., 2010a; Jeon et al., 2010b), 다양한 수계환경 변화로 인한 비점오염원의 현실적 고려를 위해 유역모형 적용의 필요성이 대두되고 있다(Gyeonggi Research Institute, 2010).

일반적으로 점오염원은 뚜렷한 방류구가 있고 강우에 의한 변동이 상대적으로 적어 하천 수질에 미치는 영향이 시·공간적으로 일정하지만, 비점오염원은 뚜렷한 방류구가 없고 강우에 많은 영향을 받아 하천 수질에 미치는 영향이 시·공간적으로 다양하므로 배출부하량과 하천 수질간의 물질수지를 규명·재현하는데 있어 점오염원 및 비점오염원의

† To whom correspondence should be addressed.
nierkys@korea.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.

적용방식은 중요하다.

미국의 TMDL에서 유역모델은 점오염원의 배출량 자료, 토지피복현황 등의 자료를 이용하여 허용부하량을 산정하는 역할을 하는데, 국내외에서 다양하게 활용되고 있는 유역모형(SWAT과 HSPF 등)의 입력자료 구성을 보면 NPDES permit에 의해 승인된 배출시설의 배출량만을 점오염원으로 간주하고 그 외 오염원은 유역 내 토지이용에 따른 비점오염원으로 간주하고 있다(Environmental Science and Engineering Division, 2005).

그러나, 우리나라는 개별오염원의 오염물질 배출경로를 각각 산정하여 해석하고 있어(NIER, 2014b) 비점 오염물질의 배출경로를 토지이용으로만 해석하는 유역모형을 우리나라 총량관리에 바로 적용할 경우 환경기초시설 등 일부 방류시설은 점오염원으로 입력가능하나 그 외 개별오염원의 배출부하량을 입력할 수 있는 합리적 방법이 없어 개별오염원의 변화에 따른 모의 결과를 확인하기 어렵다.

이런 이유로 최근까지 할당부하량 산정을 위한 유역모형의 적용방안에 대해 다양한 연구에서는 수질오염총량관리기술지침(NIER, 2014b)(이하 기술지침)에 따라 산정된 개별배출원의 배출부하량을 사전에 추정된 유달율을 적용하여 유달부하량으로 변환 후 점오염과 같은 방식으로 입력하고 있는데, 연평균배출부하량과 간헐적 실측자료에 의한 유달율로는 다양한 강우량, 유량 조건에서 나타나는 유달특성을 반영하기에 어려움이 있다(Park et al., 2012). 다양한 유달특성을 반영하기 위해 NIER (2010)은 다양한 유역특성과 유속, 유달시간과 유량변동 등을 고려하여 동적 유달율을 산정한 후 이를 통해 유달부하량을 적용한 바 있으며, Kim et al. (2014)은 동적모델을 이용하여 산정된 유달율을 적용한 바 있다.

그러나, 최적의 유달율을 이용하여 산정된 유달부하량을 유역모형에 입력하는 경우라도 하나의 유역 내 토지와 수체를 각각 하나의 덩어리로 간주하는(Lumped model) 유역모델 특성상 유역 내 다양한 공간적 분포를 가지고 있는 개별오염원에 동일한 유달율을 적용하기 때문에, 개별오염원의 공간적으로 다른 위치에서 유역 출구까지 도달하는 과정에서 발생하는 유달 특성은 고려하기 어렵다. 이는 유역 최상류에 위치한 오염원과 유역 말단에 위치한 오염원에 같은 유달율이 적용됨에 따라 출구지점에서 수질에 미치는 영향에 차이가 없다는 것을 의미하며, 모의기간의 변동이나 오염원 특성의 변화에 따라 매번 새로이 일별 유달율과 유달부하량을 산정하여 입력하는 절차를 거쳐야하므로 유동적인 대응이 어려워 모델의 환류에 의존하는 할당부하량 산정과정에 큰 단점으로 작용할 수 있다.

만일, 유역모형이 모형의 수체 한 지점에 유입된 배출량을 유하거리에 따라 특정 지점에 도달할 때까지 하천구간에서 유달율에 상응할 만큼 충분한 저감기작(Multi-segmentation)을 표현할 수 있다면, 유달율을 고려하여 미리 산정된 유달부하량을 입력하는 등 복잡한 과정을 대체함과 동시에 오염원의 공간적인 분포에 따른 영향을 고려할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 다양한 형태의 오염원이 분포하고 있는 금호강 유역에 HSPF 유역모형을 적용하고, 소유역과 하천구간의 가상적인 세분화 방법 및 추가적인 세부기능(BMP Reach tool)의 접목을 통해 오염원의 공간적 분포를 고려할 수 있는 동적 유달 과정을 재현하였으며, 이로부터 특정유량시기 유달율을 추출하여 기존의 정적 유달율 추정방법과 비교 검토함으로써 적용성을 검증하고자 한다.

2 Materials and Methods

2.1. 연구대상지역

연구대상지역은 금호A 단위유역 내 영천댐 하류에 위치한 소유역(금호A10)인 북안천 유역을 대상지역으로 선정하였다(Fig. 1). 북안천은 금호강의 지류 하천으로, 유로연장 15.9 km 수준의 지방하천이며, 경상북도 영천시 북안면으로부터 발원하여 도동을 거쳐 금호강으로 합류된다. 유역면적은 약 92.1 km²이고, 유역의 토지이용 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 북안천 유역의 토지이용특성을 현행 기술지침에서 정하고 있는 토지계 지목별로 분석하였을 때, 우리나라 전반의 토지이용특성과 비교적 유사한 수준이며, 전(Upland filed)을 제외하고 지목별 비율의 차가 10% 이내인 것을 확인할 수 있다. 이에 우리나라의 다른 유역에 확대적용을 감안할 때 상대적으로 유리한 연구지역인 점을 고려하였다.

한편, 북안천 유역은 전반적으로 축산계 오염원 밀집도가 높고 하류에 농공단지 등이 조성되어 있는 등 비교적 다양한 오염원이 산재하고 있으며, 과거로부터 금호A 유역의 유달율 산정 및 이행평가(P7), 축산오염원의 영향분석(P1~P6) 등을 위하여 지속적으로 모니터링 된 바 있다. 이에 상류로부터 하류에 이르기까지 정밀한 유역모형을 구축하고 유달 과정의 재현성을 평가하기에 적합한 것으로 판단하여 대상지역으로 선정하였다.

2.2. 유달 과정 재현을 위한 유역모형의 접근방법

2.2.1. HSPF 유역모형

HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran) 유역모형의 적용모들은 크게 3가지로 구분되며, 투수지역의 수문·수질을 모의하는 PERLND 모듈과 불투수층에 대한 IMPLND 모듈, 그리고 수체에 해당하는 RCHRES 모듈로 구성된다. HSPF는 준분포형 모형으로서, 소유역의 각 구성요소를 하나의 덩어리로 간주하여 투수층(PERLND)과 불투수층(IMPLND)으로부터 유출된 유량 및 수질을 RCHRES로 전달하는데, 이를 받아들이는 RCHRES는 기존의 수체모형과 같이 거리에 따라 다구간화 되는 것이 아니라, 기본적으로 한 소유역 당 단일구간으로 구성되기 때문에 수체 내에서 반응의 기회가 적다(Fig. 2(a)). 이러한 준분포형 모형의 특징을 보완하기 위해 Son et al. (2008)은 유역모형의 소유역을 작게 분할하여 그만큼 수계구간을 다구간화함으로써, 수체에서의 반응기회를 증가시키고, 그 규모를 변화시키며 수질모의결과에 미치는 영향을 분석하였으나, 유의한 결과를 얻을 수

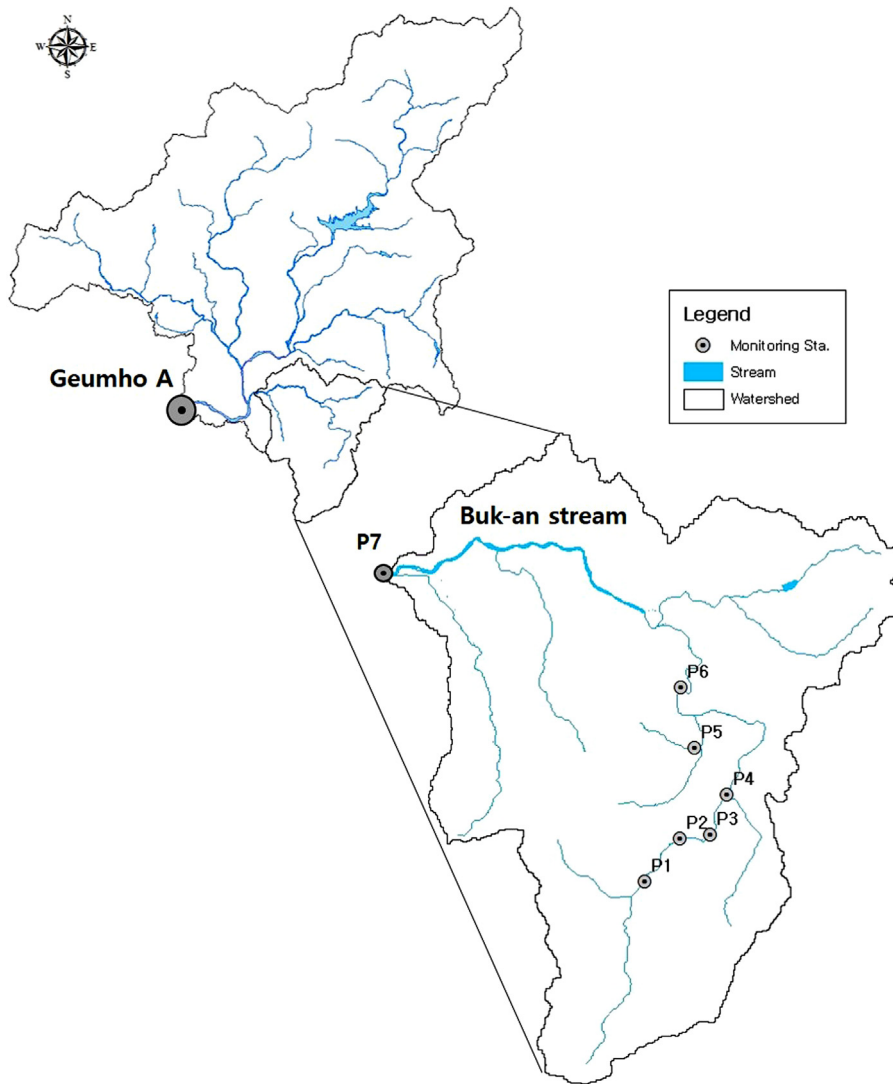


Fig. 1. Study area and monitoring stations.

Table 1. Landuse characteristics of study area

		Landuse					
		Upland field	Paddy field	Forest	Urban land	Others	Total
Buk-an stream	Area (km ²)	6.26	11.67	60.57	6.64	6.98	92.12
Watershed	Percentage	6.8%	12.7%	65.7%	7.2%	7.6%	100%
R.O. Korea	Area (km ²)	8,311.09	11,517.76	64,080.69	7,919.45	8,454.96	100,283.95
	Percentage	8.3%	11.5%	63.9%	7.9%	8.4%	100%

없었다. 이에 Jeon et al.(2011)은 인위적으로 소유역 내 RCHRES를 분할하여 다구간화 하고, 이를 통해 한 소유역 내에서 더욱 많은 반응을 할 수 있도록 모형을 수정하여 연구한 바 있다(Fig. 2(b)). 그림에도 불구하고, 기술지침에 따라 산정된 배출부하량을 수체로 전량 입력할 경우 RCHRES 내에서 오염물질을 저감시킬 수 있는 기작 및 그 정도에는 한계가 있기 때문에 유달 과정을 유역모형에서 재현하는데 충분하지 않았다.

이런 이유로 현재 많은 연구자들이 유달을 통해 미리 산정된 유달부하량을 수체구간(소유역 출구)에 입력하는 방법을 활용하고 있으며, 소유역 내 분포된 다양한 오염원으

로부터 산정된 배출부하량이 유달 과정, 특히 유하거리 및 시간을 비롯한 유달 특성에 따라 저감되는 현상을 표현하기 위해서는 유역 모형의 RCHRES에서 별도의 추가적인 기작이 필요하다.

2.2.2. HSPF BMP Reach Toolkit과 적용방법

HSPF는 매우 포괄적이고 높은 적용성을 가진 유역모형이며, 토지(PERLND, IMPLND)에서의 BMPs 적용을 표현하기 위한 BMPRAC 등의 모듈이 별도로 제공되지만, 침사지나 침투시설 등을 포함하여 하천구간에서의 BMPs 시설을 직접적으로 적용하기에는 한계가 있었다(Lee, 2011). 이

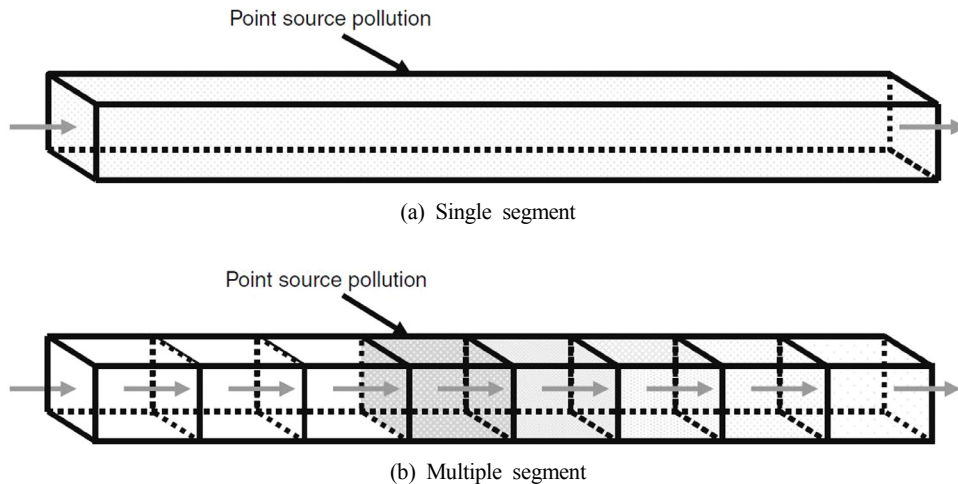


Fig. 2. Schematic representation of of single- and multiple-segmentation.

에 U. S. EPA. (2007)는 유하구간에서의 구조적 LID(Low impact development; 저영향개발)시설 적용이나, 하천구간에서 BMP 등을 통한 오염물질 저감을 표현할 수 있도록 HSPF의 UCI(Users control input)파일을 수정할 수 있는 Web-based toolkit을 개발하여 홈페이지 상에서 제공하였으며, BASINS ver.4.11(2015년 9월 25일)부터는 WinHSPF 자체에 그 기능이 포함되어 BMP Reach Toolkit이라는 이름의 추가적인 모듈로 제공하고 있다(U. S. EPA., 2015).

HSPF의 하천구간인 RCHRES는 유역 토지(PERNLD, IMPLND)로부터 각 경로(표면유출, 중간유출, 기저유출)에 따른 비점오염 배출량과 유역 내부에 위치한 점오염시설 배출량, 상류 하천으로부터의 전달량을 INFLO라는 이름의 Gate를 통해 받아들인다(Fig. 3). INFLO Gate를 통해 입력된 유량(IVOL)과 수질(ICON)은 완전히 혼합되어 반응한 후, OFLO라는 이름의 Gate를 통해 하류 하천으로 전달한다. 이 때 OFLO는 경우에 따라 전달 경로 및 방법을 달리 할 수 있도록 총 5개가 지원된다(Bicknell et al., 1996).

BMP Reach Toolkit은 저류지나 침강지, 침투도랑과 같은

침투시설, 혹은 독립적인 수로를 선택적으로 표현할 수 있으며, 이러한 침투형 시설 혹은 수로를 통해 침투되는 양은 별도의 Gate(OFLO2)를 통해 사라지게 하고, 침투되지 않는 양은 전달 Gate(OFLO1)를 통해 하류로 전달할 수 있으며, 이 때 저감시설을 통한 저감률을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Reductionrate(\%) = \frac{OFLO2}{OFLO1 + OFLO2} \times 100 \quad (1)$$

여기서, OFLO2를 통해 저감되는 양은 침투율과 거리에 따른 하상면적, 시간에 따른 함수로 결정되며, 침투율의 함수는 Maryland Method 혹은 Green-Ampt Method를 선택하여 적용할 수 있다. 이러한 방법을 응용하여, 물은 두 Gate (OFLO1, OFLO2)의 양을 모두 하류로 전달하되 오염물질은 침투되지 않은 양만 전달하면 시간과 거리에 따라 희석과 유사한 효과를 얻을 수 있는데, 이는 곧 하천으로 유입된 배출부하량이 수계구간의 특정지점에 도달할 때까지 시간과

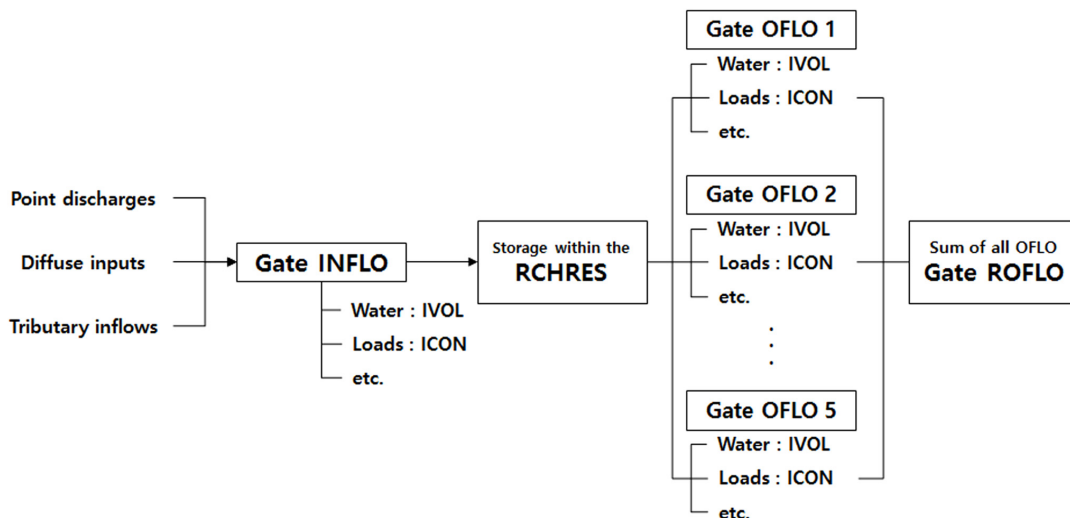


Fig. 3. Flow diagram for the HYDR section of the RCHRES application module.

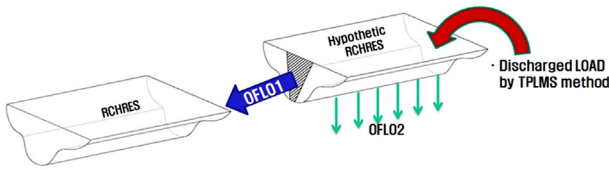


Fig. 4. The concept of delivery process using hypothetical RCHRES.

거리에 따라 감소하는 유달 과정을 간접적으로 재현하는데 이용될 수 있다(Fig. 4).

유달과정 재현을 필요로 하는 오염원은 주로 유역 내 산재되어 있는 점오염원, 특히 소규모 점오염원 등이 큰 비중을 차지하고 있는데, 이러한 오염원으로부터 배출되는 오염물질은 유역말단에 있어서 거리가 짧을수록 더욱 많은 양이 유달될 수 있는 반면, 거리가 멀수록 그 영향은 상대적으로 낮아진다. 즉 오염원의 공간적 분포가 오염물질의 유달에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 하나의 소유역 내 실제 소하천을 고려하여 유달을 위한 가상적인 하천구간(Hypothetic RCHRES; 이하 유달 RCHRES)을 연장하고, 이를 기준으로 공간적 구획을 나누어 해당하는 범위 안의 오염원으로부터 배출되는 배출량이 각각 입력될 수 있도록 하였다(Fig. 5).

이 때 모형에 입력하는 배출량은 기술지침에 따라 산정하였다. 한편, 토지계로 대표되는 비점오염원(표면유출)과 중간유출, 기저유출을 통한 오염물질 유입은 유역모형 본래의 기능으로서 토지이용에 따라 모의가 가능하다.

2.3. 유달을 산정 및 적용성 검토방법

기술지침에 따르면, 기준유량시점의 유달율은 지역여건에 적합한 오염물질 유출모형을 적용하여 다양한 시기에 대한 보정 및 검증과정을 거쳐 기준유량 시기의 환경조건에 따른 유달부하량 및 유달율을 추정하도록 제시하고 있다. 이에 기준유량 시점의 유달율을 산정함에 앞서 보정 및 검증된 유역모형으로부터 연중 다양한 유량시기에 대한 유달율

을 식 (2)에 따라 산정하였다. 여기서 L_{si} 는 모의결과로부터 i 번째 산정된 유달부하량(kg/day)이며, L_e 는 기술지침에 따라 산정된 일평균배출부하량(kg/day)을 의미한다.

$$Delivery\ Ratio\ (DR)_i = \frac{L_{si}}{L_e} \tag{2}$$

또한 산정된 연중 유달율로부터 SPSS 통계분석 프로그램을 활용하여 비선형회귀분석을 실시하였으며, 식 (3)과 같은 유달율과 유량, 소유역 면적 간의 관계식에서 상수(α) 및 지수(β, γ)를 도출하였다. 여기서 A 는 소유역 면적(km²)이며, Q 는 소유역 유출량(m³/s)을 의미한다.

$$Delivery\ Ratio\ (DR) = \alpha \left(\frac{Q^\beta}{A^\gamma} \right) \tag{3}$$

북안천의 기준유량시점은 금호A 유역 말단에 기준유량이 나타나는 시기를 기준으로 하였다. 즉 금호A 유역과 북안천 유역의 유량 모의결과로부터 단위유역(금호A)의 기준유량 시기 북안천의 유량을 도출하고, 비선형회귀식을 통해 기준유량 시점의 유달율을 산정하였다. 이렇게 산정된 기준유량 시점의 유달율은 일련의 모의과정에 대한 적용성과 재현성 평가를 위하여, 현장 모니터링 및 통계분석을 기초로 유달율을 산정한 바 있는 3단계 경상북도 낙동강 수질 오염총량관리 기본계획 최종보고서(Gyeongsangbuk-do, 2015) (이하 3단계 기본계획)에 제시된 북안천 유역의 유달율과 비교·검토하였다.

2.4. 유역모형 적용

2.4.1. 유역모형 구축

본 연구의 대상지역은 금호A 유역의 지류인 북안천이지만, 북안천의 기준유량시점은 금호A지점에서 기준유량이 나타

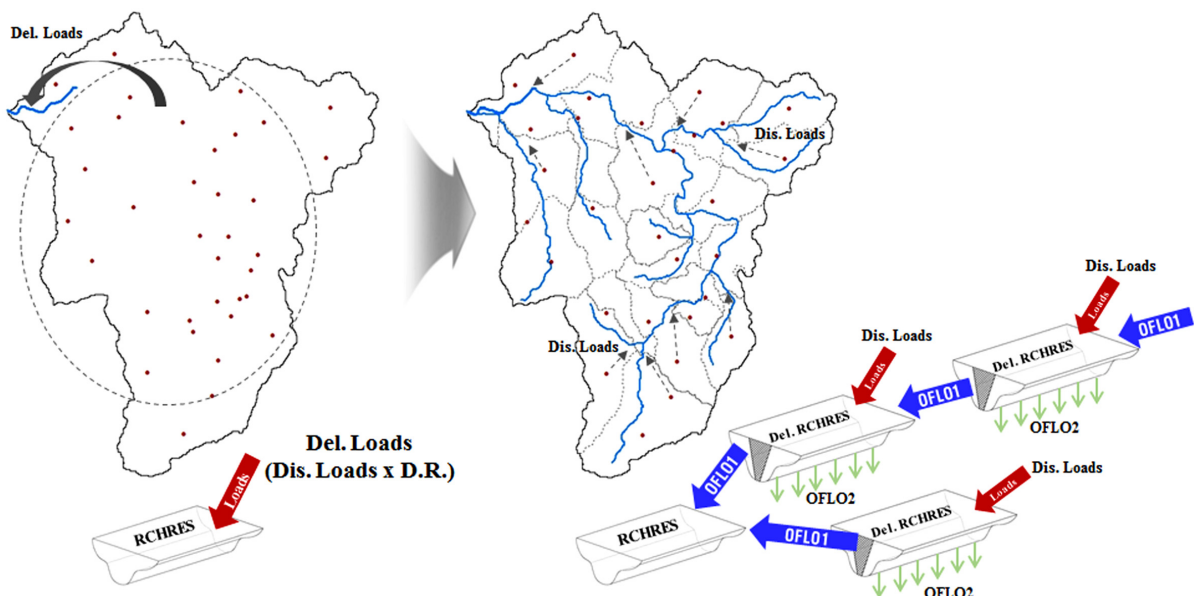


Fig. 5. The multi-segmentation concept of hypothetical RCHRES for pollutants delivery.

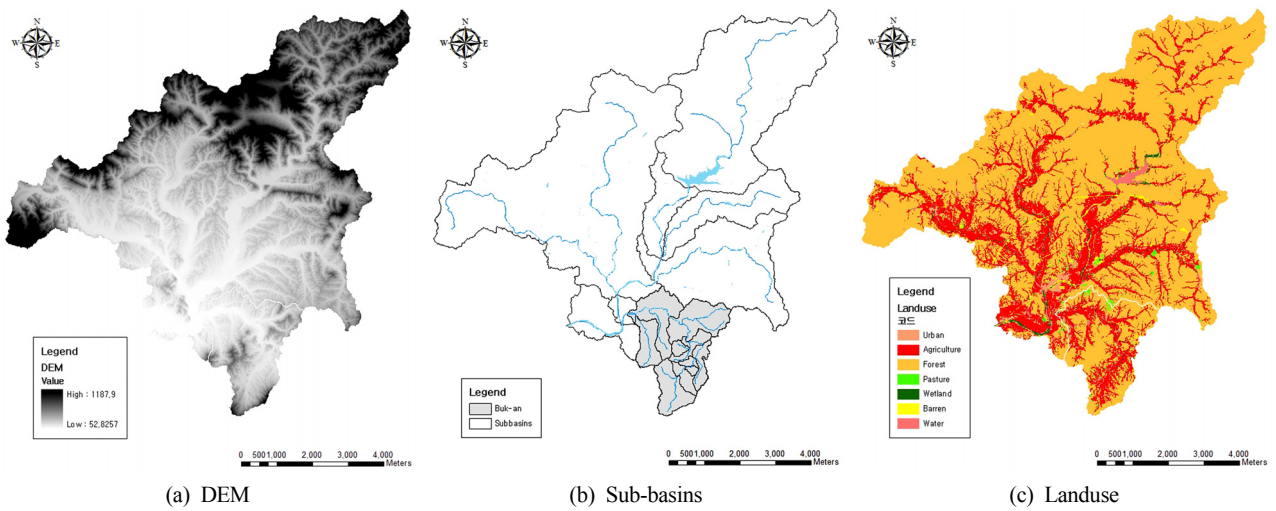


Fig. 6. DEM, sub-basins and landuse of Geumho-A watershed.

나는 시기로 선정해야 하므로, 금호A 유역까지 함께 모형을 구축하였다. Thiessen 분석 결과 금호A 단위유역은 영천기상대의 영향권에 해당하여, 기상대의 시간별 강수량, 평균기온, 풍속, 일사량 및 상대습도, 전운량 등을 수집하고 WDM(Watershed Data Management) database를 구축하였다. 또한 1:5,000 수치지도로부터 해상도 30×30 m의 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 생성한 후 BASINS에 적용하여 대상유역의 소유역을 구성하였다(Fig. 6(a), 6(b)). 소유역의 분할에 있어서는 3단계 기본계획을 참고하여 단위유역 및 각 소유역 구성에 반영하였으며, 특히 대상유역인 북안천 유역은 모형의 상세한 보정을 위해

「낙동강수계 축산계 오염배출부하량의 수체영향 분석 및 최적관리방안 연구」(NIER, 2012)에서 수행된 세부 모니터링 지점을 고려하였다. 토지이용도는 환경부에서 2008년 제작된 중분류 토지피복도를 활용하였으며(Fig. 6(c)), 각 환경기초시설의 점오염원 자료는 전국오염원조사(2005~2013) 자료를 활용하여 소규모 하수도(마을하수도) 수준까지 고려하였다. 또한 유역 배출부하량 자료는 3단계 기본계획에 제시된 자료를 이용하였다. 한편, 금호A 유역 내 위치하고 있는 영천호의 경우, 댐 모의를 구성하지 않고 영천호 방류유량과 수질을 이용하여 점오염 형태로 입력하였다. 북안천 유역은 10개 소유역으로 분할하되, 유달 RCHRES

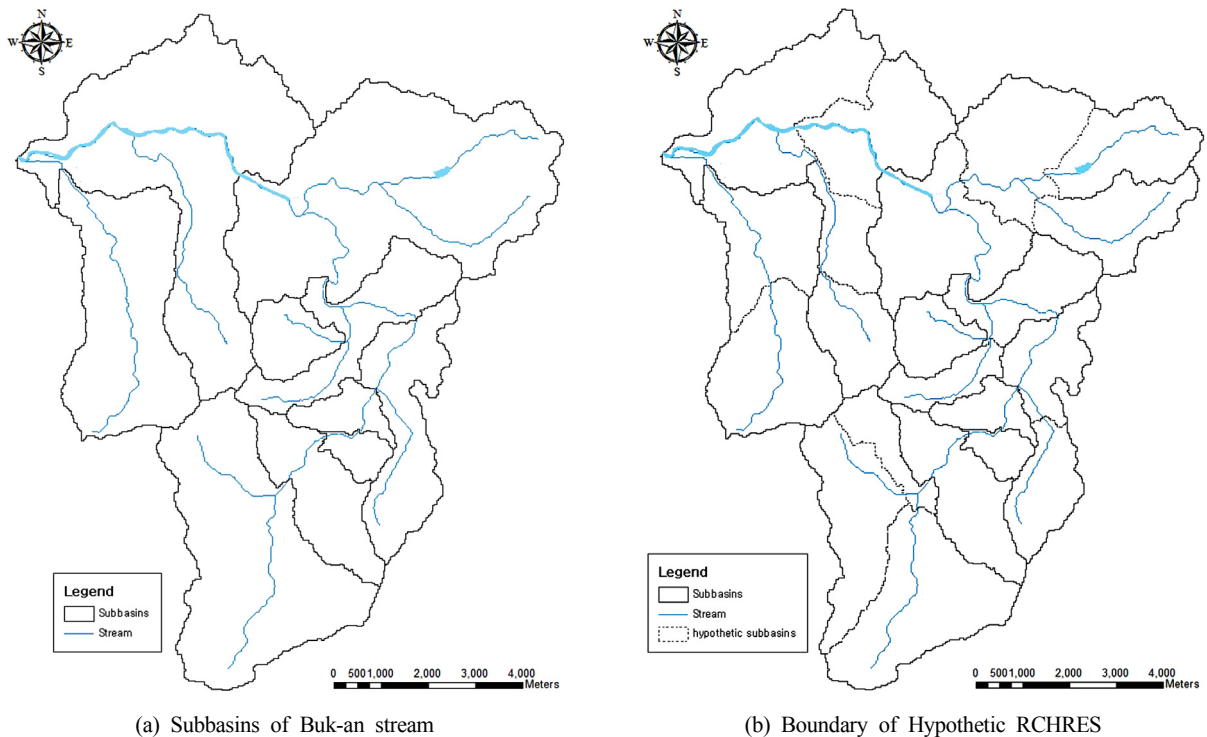


Fig. 7. Boundary of hypothetical RCHRES and subbasins of Buk-an stream.

및 그 구획은 3차 하천 이상의 소하천 구간을 고려하여 총 21개 구간으로서 구성하였으며, Fig. 7에 나타난 바와 같다. 21개의 유달 RCHRES는 해당유역에 대해 별도의 BASINS를 구축하고, 소유역 분할 과정에서 본 모형 내 소유역보다 더욱 상세하게 분할하여 HSPF의 BMP Reach Toolkit 모듈을 적용한 후, 하천형상과 특성, 거리 인자 등을 추출하여 본래 모형에 통합하였다.

2.4.2. 유역모형의 보정 및 검증

유역모형의 보정 및 검증지점은 Fig. 1에 나타난 바와 같으며, 유량은 북안천 유역의 말단지점 (P7)과 금호A 지점에서 보·검증하였다. 북안천 유역의 말단지점은 2단계 및 3단계 기본계획 수립 과정에서 유달을 산정을 위해 모니터링이 수행되었으며, 이행평가를 위해 지속적으로 모니터링되고 있어 비교적 다년간의 자료가 축적되어 있다. 또한 금호A 유역의 말단지점은 환경부 수질총량측정망 지점으로, 8일 간격의 모니터링 자료를 취득하여 보정 및 검증에 활용하였으며, 유출량 모의는 2011년부터 2013년(3년)은 보정, 2008년부터 2010년(3년)은 검증 기간으로 선정하였다. 북안천 유역의 수질 보정 및 검증은 낙동강수계 축산계 오염배출부하량의 수체영향 분석 및 최적관리방안 연구 보고서(NIER, 2012)를 참고하여, 6개 모니터링 지점(P1~P6)에서 2012년 5월부터 10월까지 수행된 15회 현장조사 결과를 이용하여 소유역 수질을 보정하는데 보완적으로 활용하였다. 한편, 북안천 유역의 말단지점(P7)의 수질은 상류의 6개 지점과 같은 2012년에 보정하고, 2013년을 검증기간으로 설정하였다.

매개변수의 보정은 시행착오법에 의해 이루어졌으며, 이는 모형의 다양한 변수를 변화시켜 상관계수 및 결정계수 등의 최적점을 찾는 방법으로 반복횟수가 충분할 경우 전체 근사 최적점에 도달 가능한 방법이나, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다(Lee and Shin, 2009). 모형효율 평가를 위한 결정계수는 U. S. EPA. (2011)에서 제안한 상대오

차(% , %Difference)를 이용하였는데, HSPF모형의 적용사례 및 연구자료를 바탕으로 Donigian (2000)은 일반적인 모형 효율의 범위와 신뢰구간을 Table 2와 같이 제시한 바 있다. 상대오차 산정방법은 식 (4)와 같으며, 이 때 O는 관측 값을, P는 모의 값을 의미한다.

$$\%Diff. = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \quad (4)$$

3. Results and Discussion

3.1. 유역모형 보정 및 검증 결과

유출량 보정 및 검증에 있어서 매개변수는 PWAT-PARM2 block의 INFILT (0.05~0.25)와 AGWRC (0.92~0.98), PWAT-PARM3 block의 DEEPFR (0.1~0.15)을 활용하였으며, 각 매개변수의 특징은 Table 3에 나타난 바와 같다.

북안천 유역은 검증기간 동안 관측 횟수가 14회에 불과하여 보정기간(108회)에 비하여 자료의 개수는 적지만, 본류의 금호A 지점과 동일 기간으로 통일하는 한편, 가용한 모든 자료를 활용하기 위하여 유역모형의 유량 보정(2011~2013년) 및 검증(2008~2010년)을 각 3년씩 설정하였다(Fig. 8). 금호A 및 북안천 유역말단(P7) 두 지점의 보정기간 동안 자료의 개수가 충분히 확보되어 보정 과정에서 매개변수를 적절하게 조정하고 고정하였으며, 검증 과정에서 금호A에

Table 2. General Calibration/Validation Targets or Tolerances for HSPF Application

Constituent	Very good	Good	Fair
Hydrology / Flow	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25
Water temperature	< 7	8 ~ 12	13 ~ 18
Sediment (SS)	< 20	20 ~ 30	30 ~ 45
Water Quality / Nutrients	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35
Pesticides / Toxics	< 20	20 ~ 30	30 ~ 40

Table 3. Hydrologic calibration parameters and possible ranges

Parameter	Description	Ranges	
		Typical	Possible
INFILT	Infiltration capacity of the soil	0.01 ~ 0.25	0.001 ~ 0.50
AGWRC	Groundwater recession rate	0.92 ~ 0.99	0.85 ~ 0.999
DEEPFR	Fraction of Groundwater inflow to deep recharge	0 ~ 0.2	0.0 ~ 0.5

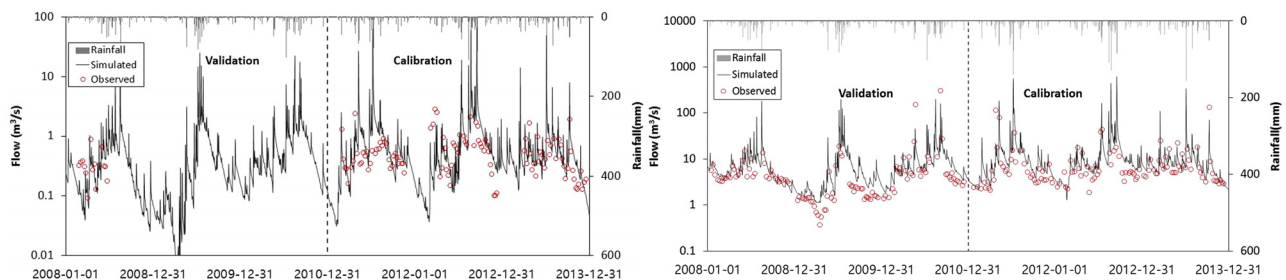


Fig. 8. Calibration and validation of flow.

서 충분히 좋은 결과를 나타내었기 때문에 북안천 유역 검증에 있어서 자료 부족을 보완할 수 있을 것으로 판단하였다.

보정기간 동안 북안천 유역 말단지점(P7)과 금호A 지점의 상대오차(% Difference)는 각각 7.98, 0.841로서, Table 2에 나타난 기준에 따라 모형효율은 Very Good으로 평가되었으며, 검증에 있어서도 P7 지점과 금호A 지점 각각 (-)6.36, (-)2.483로서 Very Good으로 평가되었다. 이 때 상대오차가 양의 값을 나타내는 것은 모의 결과에 비하여 상대적으로 실측치가 높게 나타나는 경우를 의미하고, 반면 음의 값을 나타내는 것은 실측치에 비하여 모의치가 높은 경우를 의미한다.

한편, 북안천 유역의 수질 보정 기간을 통일하기 위하여 2012년을 보정기간으로 선정하고, 북안천 유역의 말단지점인 P7 지점은 2013년 모니터링 자료를 활용하여 검증하였다. 그 결과는 Table 4와 Fig. 9에 나타난 바와 같으며, 보정 결과 모형효율은 P1~P6 세부 모니터링 지점에서 수질 항목에 따라 Good~Very Good으로 평가되었다. 또한 북안천 말단 지점인 P7 지점은 보정에서는 T-P, 검증에서 T-N이 Good으로 평가되었으나, 그 외 항목은 Very Good으로 평가되어, 모의치가 실측치를 비교적 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

3.2. 북안천 유역의 유달을 산정 결과

북안천 유역의 유량 및 수질에 대한 연중 모의결과로부터 동적 유달을 산정한 뒤, 비선형 회귀분석을 통해 함수식의 상수(α)와 지수(β, γ)를 도출하였다(Table 5).

북안천 유역의 기준유량시점 유달을 산정에 앞서, 금호A 지점에서 기준유량이 나타나는 시기 소유역 유량을 도출할

Table 5. Parameters of nonlinear regression equation on delivery ratio (Buk-an stream)

	α	β	γ
BOD	0.128	0.467	-0.033
T-N	0.469	0.509	-0.045
T-P	0.150	0.688	-0.036

필요가 있다. 이 때, 유역모형의 모의결과로부터 도출된 유량의 경우 소수점 아래의 수가 기준유량과 완벽하게 일치하기에는 현실적으로 어렵기 때문에, 일정 수준의 오차율이 고려되어야 한다. 본 유역모형의 유량 보정과 검증에 있어서 모형효율은 모두 Very Good으로 평가되었는데, 그 기준은 상대오차 $\pm 10\%$ 이내에서 고려된다(Table 2). 따라서 현재 구축된 유역모형의 오차율이 $\pm 10\%$ 이내의 범위에 있는 것으로 간주하고, 모의 결과로부터 기준유량 시점을 추적함에 있어서 같은 수준의 범위로 설정하였다. 즉 기준유량 발생시점을 “기준유량 $\pm 10\%$ ” 범위에서 추적하였고, 추적 연도는 북안천의 보정기간이면서 3단계 기본계획의 기준연도인 2012년으로 결정하였다.

금호A 지점의 기준유량($\pm 10\%$) 범위에서 북안천 유량을 추적한 결과는 Table 6에 나타난 것과 같다. 2012년 모의 결과로부터 금호A 지점에서 기준유량의 오차범위 이내에 있는 유량이 나타난 횟수는 저수량 총 14회, 평수량 총 57회로 분석되었으며, 이와 동일 시기에 북안천에서 발생한 유량의 평균치는 저수량 조건은 $0.186 \text{ m}^3/\text{s}$, 평수량 조건은 $0.551 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 분석되었다. 다만 이때의 변동 범위는 금호A 유역과 비교할 때 상대적으로 크게 나타났는데, 저수기는

Table 4. Results of calibration and validation for simulated water-quality

	Constituent	Calibration		Validation	
		%Difference	Grade	%Difference	Grade
P1	BOD	(-)3.61	Very Good	-	-
	T-N	8.54	Very Good	-	-
	T-P	(-)2.26	Very Good	-	-
P2	BOD	(-)4.92	Very Good	-	-
	T-N	8.16	Very Good	-	-
	T-P	(-)7.63	Very Good	-	-
P3	BOD	(-)22.26	Good	-	-
	T-N	15.72	Good	-	-
	T-P	(-)3.60	Very Good	-	-
P4	BOD	8.69	Very Good	-	-
	T-N	9.45	Very Good	-	-
	T-P	22.22	Good	-	-
P5	BOD	(-)8.03	Very Good	-	-
	T-N	7.52	Very Good	-	-
	T-P	9.77	Very Good	-	-
P6	BOD	(-)16.43	Good	-	-
	T-N	18.69	Good	-	-
	T-P	24.93	Good	-	-
P7	BOD	10.14	Very Good	(-)1.71	Very Good
	T-N	10.56	Very Good	(-)22.66	Good
	T-P	19.98	Good	(-)9.87	Very Good

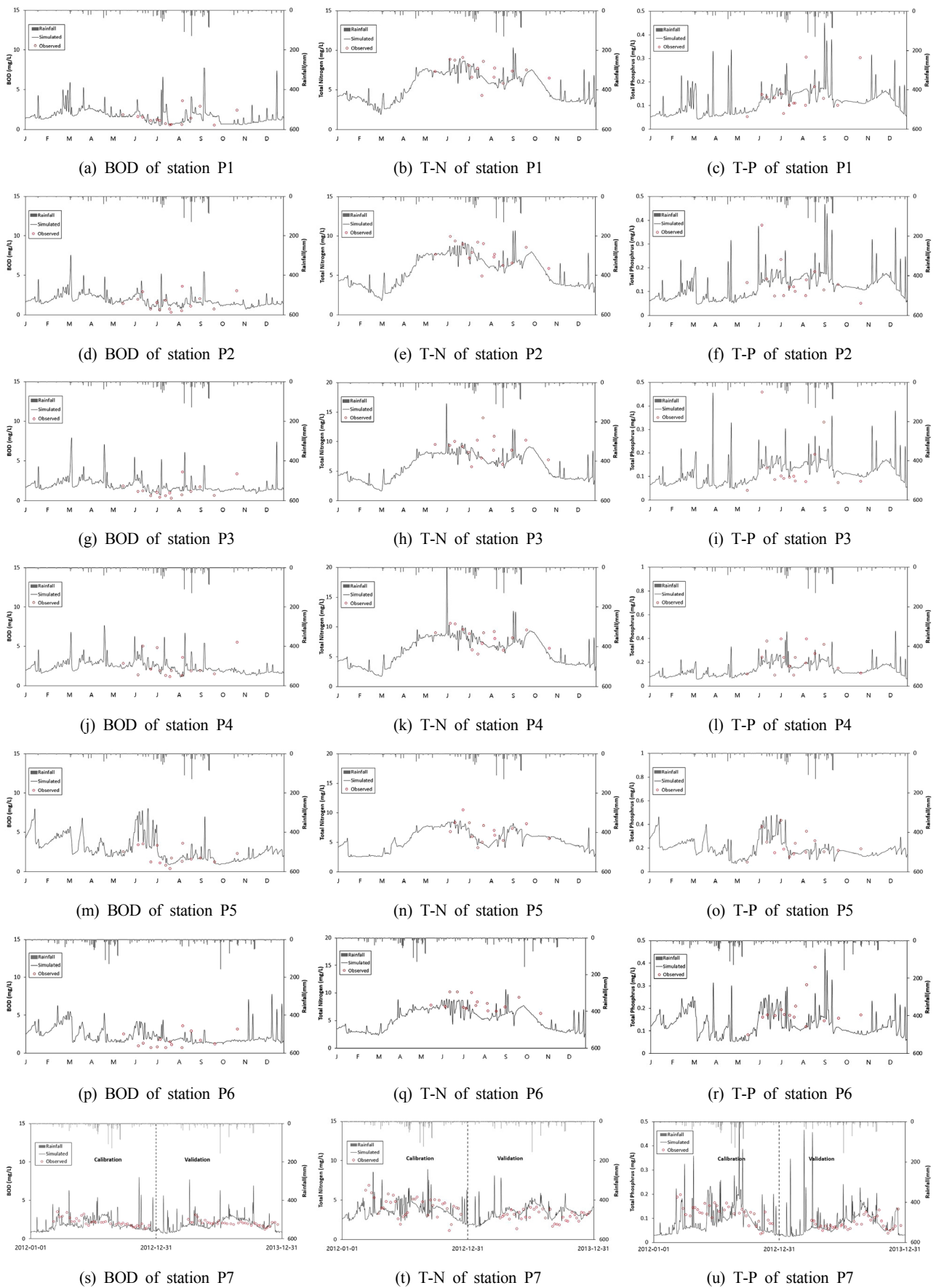


Fig. 9. Calibration of water-quality on P1 ~ P7, and validation on the station P7

Table 6. Table 6. Simulated flow of Buk-an stream, when the simulated flow of Geumho A is in the standard-flow range

	Dry conditions (Q ₂₇₅)		Mid-range conditions (Q ₁₈₅)	
	Standard flow (m ³ /s)	Differential Range (m ³ /s)	Standard flow (m ³ /s)	Differential Range (m ³ /s)
Geumho A	3.654	3.289 ~ 4.019	7.604	6.844 ~ 8.364
Buk-an stream	0.186	0.159 ~ 0.217	0.551	0.419 ~ 0.708

Table 7. Comparison of delivery ratio between 3rd basic plan and regression by HSPF

	Dry conditions (Q ₂₇₅)		Mid-range conditions (Q ₁₈₅)	
	¹ MP	² HSPF	¹ MP	² HSPF
BOD	0.066	0.067	0.179	0.112
T-N	0.256	0.242	0.590	0.421
T-P	0.056	0.055	0.140	0.117

¹MP : Delivery ratio from 「The Third Stage Basic Plan of Gyeongsanbuk-do TMDL in Nakdong River」

²HSPF : Delivery ratio from nonlinear regression by results of HSPF model simulation

평균치 대비 -14.6~16.6%, 평수기는 평균치 대비 -23.9~28.4% 수준이었으며, 이는 북안천이 금호강의 지류하천으로서 본 류구간에 비하여 상대적으로 유량변동이 크게 나타남에 기인한 것으로 판단된다.

한편, 분석된 저수기와 평수기 평균유량과 비선형회귀분석의 관계식으로부터 북안천 유역의 기준유량시점 유달율을 산정하고, 3단계 기본계획에 제시된 북안천 유역의 유달율과 비교하였으며, 그 결과는 Table 7에 나타낸 것과 같다. 저수기 수질항목별 유달율을 비교할 때 그 차이는 1.5~5.5% 수준으로서 매우 유사한 결과를 보인 한편, 평수기 시기에는 약 16.4~37.4% 수준으로 비교적 더 큰 차이를 보였다. 그러나 3단계 기본계획 상에 제시된 유달율 산정을 위한 회귀식은 북안천 유역만이 아니라 금호A 단위유역 내 복수의 지점에서 측정된 모니터링 결과에 기초하고 있다는 점에서 다소 차이를 보일 수 있으며, 본 연구에서의 회귀식 도출을 위한 자료는 유역모형에 의해 모의된 연중 연속적인 예측 값이라는 점을 함께 고려할 필요가 있다. 따라서 유역모형의 결과로부터 도출된 유달율과 실측을 통해 도출된 유달율 사이에 일정 수준 이상 유사성을 가진 것으로 판단할 수 있으며, 유달 RCHRES를 이용하여 유역모형에서 표현된 유달 과정은 합리적인 범위 내에서 재현 가능할 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 수질오염총량관리를 위한 유역모형의 적용방안에 있어서 핵심이라고 할 수 있는 유달 과정의 재현 문제를 해결하기 위해, 최근 U. S. EPA. (2015)에서 공개한 BMP Reach Toolkit을 활용하여 배출된 오염물질이 특정 수계구간에 도달할 때까지 저감되는 현상을 표현할 수 있는 유달 RCHRES를 구성하였다. 이러한 방법은 인위적으로 한 소유역 내 수체를 다구간화(Multi segmentation) 혹

은 연장할 수 있어, 유역 내 오염원의 분포를 더욱 상세히 고려할 수 있고, 많은 연구자들(Jeon et al., 2011; Son et al., 2008)이 언급해왔던 준분포형 유역모형의 수계구간 단순화 문제를 완화할 수 있고, RCHRES 내 거리와 시간에 따른 함수에 의해 유달 과정에서 오염물질을 저감시키는 기작을 추가 및 조정할 수 있다. 다만, 토지이용 기반의 비점오염 유출 등은 유역 수문·수질을 모의하는 유역모형 본연의 기능을 통해 충분한 모의가 가능하므로, 기본적으로 구축되는 모형의 하천은 유지한 상태에서 점오염원의 분포를 고려할 수 있도록, 소하천까지 추가적인 유달 RCHRES 구간을 구성함으로써 기술지침에 따라 산정된 일평균 배출부하량의 유달을 재현하도록 하였다.

보정 및 검증된 모형의 모의결과로부터 유달 과정 재현에 대한 적용성을 검토하기 위하여, 북안천 유역의 연중 유달율을 산정한 후 이로부터 비선형회귀식을 도출하여, 3단계 기본계획에 제시된 북안천 유역의 유달율과 비교하였다. 이를 위해, 금호A 유역에 고시된 저·평수기 기준유량이 나타나는 시기 북안천 유역에서의 유량을 추적하여 그 평균값을 앞서 도출한 비선형회귀식의 입력하여 기준유량시점의 유달율을 산정하였다. 그 결과 1) 저수기 유달율은 BOD, T-N, T-P 모두 유사한 수준으로 큰 차이를 보이지 않았다. 2) 평수기 유달율은 모형 결과가 3단계 기본계획 대비 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 평수기 금호A 지점의 유량 설정 범위에 비하여 북안천 말단 지점의 유량 변동이 확연히 크게 나타남에 기인한 것으로 판단된다. 다만, 유역 규모에 큰 차이가 있고, 북안천이 지류하천이고 3단계 기본계획과 모형에 있어서 유달율 산정에 활용한 자료의 시기 및 지점이 일치하지는 않는다는 점을 감안할 때 합리적으로 받아들일 수 있는 범위 이내인 것으로 판단된다. 이로부터 모형 내 유달 과정은 비교적 적정한 수준에서 재현 가능하며, 배출특성과 유하거리에 따라 BMP Reach Toolkit을 활용하여 생성한 유달 RCHRES의 저감 기작을 조정함으로써 유역특성을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Bicknell, B. R., Imhoff, J. L., Kittle, J. L., Donigan, A. S., and Johanson, R. C. (1996). *Hydrological Simulation Program-FORTRAN user's manual ver 12*, U. S. EPA.
- Donigan, A. S. (2000) Lecture #19, *Calibraion and Verification Issures, HSPF Training Workshop Handbook and CD*, Office of Science and Technology, U. S. EPA., pp. 19-22.
- Environmental Science and Engineering Division. (2005). *Kieser and Associates, SWAT Modeling of the St. Joseph River*

- Watershed*, Michigan and Indian, Kieser and Associates.
- Gyeonggi Research Institute. (2010). *Application of Watershed Model in Total Maximum Daily Load*, Gyeonggi Research Institute. [Korean Literature]
- Gyeongsanbuk-do (2015). *The Third Stage Basic Plan of Gyeongsanbuk-do TMDL in Nakdong River*, Gyeongsanbuk-do. [Korean Literature]
- Hwang, H. S. (2007). *Applicability Study of BASINS/WinHSPF on TMDL-Nakdong River Basin Case Study*, Doctor's Thesis, Konkuk University. [Korean Literature]
- Hwang, H. S., Rhee, H. P., Ahn, K. H., Park, J. H., Kim, Y. S., and Lee, S. J. (2016). A Study on Estimated Pollutant Delivery Load for the Basic Plan of TPLC, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(4), pp. 375-383. [Korean Literature]
- Jeon, J. H., Choi, D. H., and Kim, T. D. (2010a). Analysis of Characteristics of Delivered Nonpoint Source Pollution at Forested Watershed, *Journal of Korean Society of Urban Environment*, 10(3), pp. 273-280. [Korean Literature]
- Jeon, J. H., Choi, D. H., Lim, K. J., and Kim, T. D. (2010b). Estimating Nutrients Delivery Ratios at the Subwatershed Scale-A Case Study at the Bochung-A Watershed, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, pp. 52(5), 27-35. [Korean Literature]
- Jeon, J. H., Lim, K. J., Yoon, C. G., and Engel, B. A. (2011). Multiple Segmented Reaches Per Subwatershed Modeling Approach for Improving HSPF-Paddy Water Quality Simulation, *Paddy Water Environment*, 9, pp. 193-205.
- Kim, E. J., Park, B. K., Shin, D. S., Kim, Y. S., and Rhew, D. H. (2014). The Study on Methods for Setting of Water Quality Goal and Estimation of Allocation Loads on TMDL System Using a Dynamic Water Quality Model, *Journal of Korean Society on Environmental Engineers*, 36(9), pp. 629-640. [Korean Literature]
- Lee, S. B. (2011). *BASINS/HSPF-LID Development for Watershed Management in Korea*, Master's Thesis, Konkuk University. [Korean Literature]
- Lee, S. C. and Shin, D. C. (2009). Performance Comparison of Genetic Algorithm and Trial-and-error Method in the Member Size Optimization, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 25(10), pp. 3-10. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2014). *Statistic on Wastewater Treatment*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2010). *Study on Application of Watershed Model for Total Water Pollutant Load Management System (TPLMS)*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Study on Best Management Practice and Analysis of Discharged Pollutant Load from Livestock Farm in Nakdong River Watershed*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2014a). *Study on Applicability and Methodology of Dynamic Water-quality Model in Korean TMDL*, 11-1480523-002255-01, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2014b). *The Technical Guideline for Total Water Pollutant Load Management System*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Park, J. H., Hwang, H. S., Rhew, D. H., and Kwon, O. S. (2012). Estimation of Delivery Ratio Based on BASINS/HSPF Model for Total Maximum Daily Load, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(6), pp. 833-842. [Korean Literature]
- Son, Y. K., Yoon, C. G., Jeon, J. H., and Jang, J. H. (2008). Effect of Subwatershed Size on the BOD Loading Estimate in Hydrological Simulation Program-Fortran Simulation, *Proceedings of the 12th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management, Kohn Kaen, Thailand*, pp. 25-29.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2007). *EPA BASINS Technical Note 9, Web-based HSPF Toolkit to Support Low Impact Development (LID) and Other Urban Stormwater Modeling Applications*, Office of Water 4305, United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2011). Lecture #15, *Watershed Model Calibration and Validation : Issues and Procedures*, <https://www3.epa.gov/ceampubl/basins/training/b4lec15.pdf>, pp. 11.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2015). *BASINS 4.1 (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) Modeling Framework*, National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina.