

BASINS/HSPF와 연계한 유황별 비점유달부하량 산정방법 개발

Development of a Method for Estimating Non-Point Pollutant Delivery Load of Each Reference Flow with Combination of BASINS/HSPF

이용운[†] · 송광덕* · 이재춘 · 윤광식** · 류덕희* · 이수웅* · 이신후***
 Yong-Woon Lee[†] · Kwang-Duck Song* · Jae-Choon Lee · Kwang-Sik Yoon**
 Doug-Hee Rhew* · Su-Woong Lee* · Shin-Hoo Lee***

전남대학교 환경공학과 · *국립환경과학원 수질총량연구과 · **전남대학교 생물산업공학과 · *** (주)삼안 환경부
 Department of Environmental Engineering, Chonnam National University

*Environmental Cap System Research Department, National Institute of Environmental Research

**Department of Biosystems and Agricultural Engineering, Chonnam National University

***Environmental Department, Saman Corporation

(2009년 12월 31일 접수, 2010년 01월 29일 채택)

ABSTRACT : The purpose of this study is to develop a method for estimating the non-point pollutant delivery load of each reference flow (flows of dry, low, normal, abundant and flood seasons) with combination of BASINS/HSPF. The effectiveness of this method is evaluated by applying it to the watershed of Dongbok stream. The flow, BOD and T-P reliability indices (RI) of the BASINS/HSPF for the watershed of Dongbok stream are 1.59, 1.41, 1.28, respectively, and thus the similarity between measured and estimated values is high. The non-point pollutant load delivery ratios of BOD and T-P for the flows of dry, low and normal seasons, which are estimated by such constructed BASINS/HSPF, are 0.36 and 1.09, 0.82 and 2.19, 6.02 and 16.90, respectively, as compared with daily average of non-point loads for a year. These results show that the non-point pollutant delivery load should be estimated and applied for each reference flow, and in this case the method for estimating the non-point pollutant delivery load of each reference flow can be useful.

Key words : Non-point pollutant, Delivery loads, Watershed model, Reference flow, TMDL

요약 : 본 연구에서는 유역모형인 BASINS/HSPF와 연계하여 비점유달부하량을 유황별(갈수기, 저수기, 평수기 등)로 산정하는 방법을 개발하고, 이를 전남지역에 위치한 동북천 유역에 적용하여 그 효용성을 평가하였다. 동북천 유역에 대한 BASINS/HSPF 모형의 보정·검증결과는 유출유량, BOD 및 T-P의 신뢰도지수가 각각 1.59, 1.41, 1.28로서 실측값과 예측값의 유사성은 높게 나타났다. 이와 같이 구축된 BASINS/HSPF 모형을 사용하여 동북천 유역의 갈수기, 저수기, 평수기에 대한 BOD와 T-P 비점유달부하량을 각각 구하면, 연간 일평균 비점배출부하량과 대비하여 0.36과 1.09, 0.82와 2.19, 6.02와 16.90이었다. 이러한 결과는 비점유달부하량을 유황별로 산정하여 서로 다르게 반영할 필요성이 있음을 보여주고 있으며, 이러한 경우에 본 연구에서 개발한 유황별 비점오염유달부하량 산정방법은 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

주제어 : 비점오염, 유달부하량, 유역모형, 기준유량, 오염총량

1. 서론

강이나 하천으로 유입되는 오염물질은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있는데, 점오염원(Point Source)은 생활하수처리장과 같이 일정한 장소나 시설에서 일정한 양의 오염물질이 지속적으로 배출되는 오염원이며, 비점오염원(Non-point Source)은 농경지와 같이 오염물질이 넓은 면적에 공간적으로 분포하는 오염원으로 정의된다. 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제2조에 정의된 비점오염원은 '도

시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원'으로, 일명 '빗물로 인한 오염'이라고 불리어 지기도 한다.

점오염원은 거의 대부분이 환경기준에 의한 규제대상이고 비점오염원에 비해 오염원 관리가 용이하기 때문에 비점오염원보다는 점오염원의 오염물질을 처리하기 위한 환경기초시설들이 매년 확충되었고, 이에 따라 환경기초시설의 설치에 필요한 점오염원별 배출특성이나 처리방법 등의 조사는 많이 이루어져 왔다. 즉, 비점오염원의 경우에는 거의 대부분이 환

[†] Corresponding author : E-mail : ywlee@chonnam.ac.kr Tel : 062-530-1861 Fax : 062-530-0678

경기준에 의한 규제대상이 아니며 오염원이 넓게 분포하고 확인이 불분명하여 관리가 어렵기 때문에 비점오염원보다는 점오염원의 오염물질 정화에 초점이 맞추어져 왔다.^{1,2)}

그러나 점오염원의 오염물질 정화만을 가지고는 수질악화를 둔화시킬 수는 있으나, 비점오염원의 영향으로 수질은 향상되지 않고 완만하나마 계속적으로 악화될 것으로 전망되기 때문에 앞으로는 점오염원과 병행하여 비점오염원의 오염물질 정화시설 설치도 많이 이루어질 것으로 전망된다. 하지만, 점오염원 정화사업과 관련한 연구나 적용사례는 비점오염원에 비해 상당히 많이 있으나, 비점오염원 정화사업은 사업시행에 필요한 기초조사나 계획수립이 제대로 수행된 경우가 많지 않아 사업시행에 어려움을 겪고 있다.

따라서 최근에는 연구의 초점이 점오염원이 아닌 비점오염원으로 옮겨가고 있는 추세에 있고, 연구내용은 비점오염원의 종류 및 유출특성, 비점오염원별 원단위, 강우와 비점오염 유출량과의 상호관계, 비점오염물질의 양이 수질에 미치는 기여도, 비점오염원 정화기술 등을 포함하고 있다.

특히, 우리나라에서는 4대강 특별법(한강 : 1999, 낙동강 등 3대강 2002)을 제정하여 수질오염총량관리제를 유역관리 수단으로 도입하여 현재 시행중에 있고, 수계별 관리대상 오염물질은 BOD와 T-P(총인)인데, BOD의 기준 유형(갈수기, 저수기, 평수기, 풍수기, 홍수기)은 저수기이고, T-P의 경우에는 단위유역별로 특성에 따라 저수기 또는 평수기를 적용하고 있다.³⁾ 그러나 강우영향에 의해 하천 유형은 시기별로 다르고, 이에 따라 하천에 도달하는 오염물질의 유달부하량도 유형시기별로 다르다. 하지만 오염물질별 유달부하량은 수질오염총량관리제에서는 저수기 또는 평수기에 해당하는 것이 필요하고, 비점오염정화시설 설치의 경우에는 유입수질 책정을 위해 모든 유형별로 구분된 것이 필요하다. 이와 같이 오염물질별 유달부하량은 사용목적에 따라 유형별로 구분하여 산정할 필요성이 있다. 따라서 본 연구의 목적은 유역모델과 연계하여 유형별로 유달부하량, 특히 비점유달부하량을 산정하는 방법을 개발하는 것이다.

현재 많이 이용되고 있는 유역모형은 미국 농무성에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool),⁴⁾ 미국 환경청에서 개발한 WinHSPF (Windows Interface to Hydrological Simulation Program-Fortran),⁵⁾ SWMM (Storm Water Management Model)⁶⁾ 등이 있으며, 유역의 특성과 모의 목적에 따라 이에 적합한 유역모형을 선택하여 사용하고 있다.

2. 연구방법

2.1. 유형별 비점유달부하량 산정방법

현재 「제 2단계 수계오염총량관리 기술지침」(이하 “기술지침”이라 한다)에서는⁷⁾ 하천에 도달하는 오염물질의 유달부하량을 2단계로 구분하여 산정하고 있다. 첫 번째는 오염원별 배출부하량을 산정하고, 두 번째는 이러한 배출부하량을 입력자료로 한 수질모의방법(QUAL2E, QUALKO 등)을 통해 하천까지의 유달율을 구하므로써 유달부하량을 최종 산정한다.

오염원별 배출부하량 산정시에 점오염원으로부터의 오염 배출부하량은 유형에 따라 변동 요소가 거의 없어 차이가 크지 않으나, 비점오염원의 경우에는 강우량에 따라 그 차이가 크게 나타날 수 있다. 따라서 기술지침에서는 월별로 일당 10 mm 이상의 강우를 반영하여 배출부하량을 산정하고 있으며, 월별 강우크기에 따라 월별 배출부하량의 차이가 나타난다. 그러나 이러한 배출부하량을 입력자료로 사용하는 수질모의 과정을 통하여 수계유역으로부터 하천까지 도달하는 오염물질 유달부하량을 구하고 있다. 하지만 이러한 방법은 강우크기나 비강우시 유형에 따른 유달부하량의 변화를 시계열에 따른 일별 또는 일정 시간대별로 계산하여 제시하기 곤란하다. 그러므로 유역모형을 이용하여 강우량에 따른 유출 유량뿐만 아니라 오염물질 유달부하량을 시계열에 따라 함께 모의하는 방법이 현재 많이 이용되고 있다.

이러한 유역모형의 모의과정을 통하여 얻어진 계산결과를 이용하여 어느 수계의 유형별 오염물질 유달부하량, 특히 비점유달부하량을 산정하는 방법은 Fig. 1에 보여진다. Fig. 1에 나타난 비점유달부하량의 유형별 산정 방법을 설명하면, 우선 WinHSPF, SWAT, SWMM 등과 같은 유역모형들 중에서 모의대상 수계에 맞는 적절한 모형을 선정하여 모의한다. 그리고 시계열에 따른 모의결과(시간별 또는 일 모형량 및 수질)를 이용하여 오염물질 유달부하량을 일별로 산정하여 유형별로 분류한다. 유역 내 수위국 등의 유량 측정 자료에 기초하여 해당 수계의 유형을 갈수기, 저수기 등으로 분류하고, 각 유형에 해당되는 일별 유달부하량의 합을 모의기간 동안의 해당 유형의 총 일수로 나누면 해당유형의 일별 유달부하량의 산정이 가능하다. 이와 같은 작업을 유형별로 실시하게 되면 갈수기, 저수기, 평수기, 풍수기, 홍수기의 각각에 대한 유달부하량이 산정될 수 있다. 한편 유형별 비점유달부하량을 산정하기 위하여 갈수기 유량 이하의 유달부하량의 합을 해당 총 일수로 나누고, 이를 일별 점유달부하량으로 책정하였다. 이는 갈수기 이하의 유량에서는 유량이 매우 작아, 유역내의 비점오염의 유출이 없거나, 무시할 만큼 적다고 가

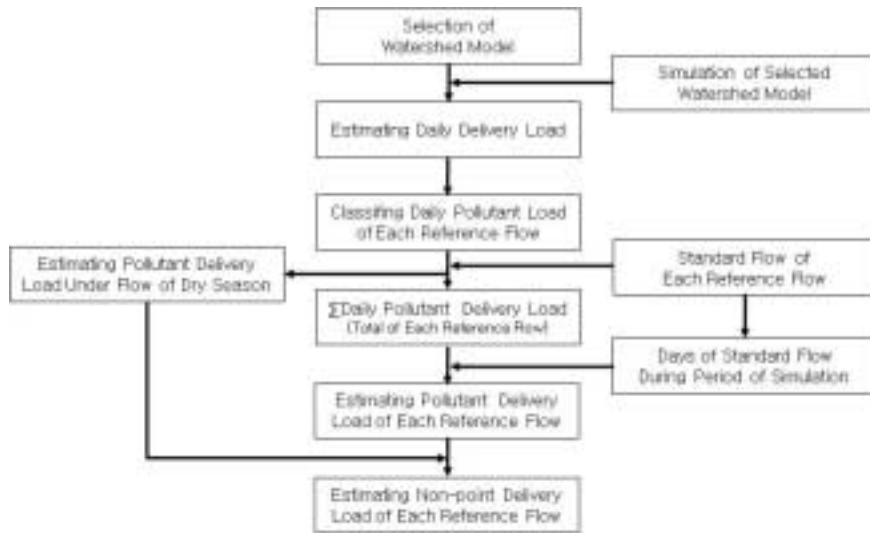


Fig. 1. Flow chart of estimating non-point pollutant delivery loads.

정하여, 이때의 유달부하량의 전부는 점유달부하량인 것으로 간주하였다.

따라서 유황별 비점유달부하량은 산정된 유황별 일당 유달부하량에서 갈수유량 이하의 일당 점유달부하량을 뺀 것으로 구할 수 있다. Fig. 1의 유황별 비점유달부하량 산정과정은 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$NP_{ij} = (\sum_{k=1}^{n_i} X_{i,j,k}) / n_i - P_{i,j,k} \quad (1)$$

여기서, NP_{ij} = 단위유역 i 내의 소유역 j 의 유황별 비점유달부하량(kg/d), $X_{i,j,k}$ = 단위유역 i 내의 유황별 기준일수 k 에 대한 소유역 j 의 연평균 일별유달부하량(kg/d), n_i = 단위유역 i 내의 유황별 기준일수와 일치하는 날짜 k 의 합계(days), $P_{i,j,k}$ = 단위유역 i 내의 소유역 j 에 대해 갈수기 기준 유량 이하일 때 유달부하량(kg/d).

2.2. 적용성 평가 대상유역

본 연구에서 개발한 유황별 비점유달부하량 산정방법의 적용성 평가를 위한 대상유역은 전라남도 동부지역에 위치한 주암댐의 유입지천인 동북천 유역(Fig. 2)이다. 이 유역의 동쪽은 보성강 유역과 접하고 서쪽으로는 화순천 유역과 접하고 있으며, 유역형상은 남북으로 장방형을 이룬다.

동북천은 백아산에서 발원하여 남으로 약 22 km에 위치한 동북댐을 지나 모후산에서 발원한 지류인 유천천과 합류한 후 남하하여 주암댐으로 유입된다. 수계는 행정구역상 담양군 창평면, 대덕면, 그리고 화순군 남면, 동북면, 북면, 이서면 일부를 포함하고 있으며, 유역면적은 380.49 km²이고, 하천



Fig. 2. Case study area, and sample collection sites.

유로연장은 58.80 km에 이른다.

그리고 동북천 상류에 있는 동북댐은 광주광역시의 생활용수 공급을 위한 전용댐으로서 1971년에 준공되었으며, 이서천, 남천, 동북천, 길성천, 내북천을 유입하천으로 가지며, 유역면적 135 km², 연평균 수면적 4.8 km², 총저수용량 99.5 백만 m³이며, 용수이용량은 90,761천 m³/yr이다.

동북천의 하류에는 주암댐이 위치하고 있는데, 이 댐은 1991년에 보성강 하류지역인 순천시 주암면 대곡리와 구산리 사이 협곡을 막아 완공하였으며, 저수량은 4억 5,700만 m³

이고, 유역면적은 1,010 km²이다. 또한 주암댐과 도수터널로 연결된 수위 조절지댐인 상사댐이 있으며, 이 댐은 저수량 2억 5,000만 m³, 발전시설 2만 5,000 KW이다. 이 2개의 댐에서는 광주광역시, 나주시, 여수시, 순천시, 광양시, 고흥군, 화순군 등에 하루 약 120만 m³ 정도의 생활 및 농·공업용수를 공급하고 있다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 유역 오염배출부하량 산정

동북천 유역의 오염배출부하량을 산정하기 위하여 오염원 조사를 실시하였고, 이러한 조사결과를 이용하여 기술지침에 따라 유역내 오염물질별 배출부하량을 산정하였다. 오염물질 배출부하량은 점배출부하량과 비점배출부하량으로 나누어 산정하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

BOD 배출부하량은 동북댐 유역이 125.6 kg/d, 유천천 유역이 48.2 kg/d, 장전수위국 유역(동북댐 유역과 유천천 유역 포함)이 216.9 kg/d로 산정되었다. 점배출부하량과 비점배출부하량의 비율을 살펴보면 동북댐 유역은 비점배출부하량이 66%, 유천천 유역은 52%, 그리고 장전수위국 유역은 59%로 산정되었다. 또한 T-N 배출부하량은 동북댐 유역이 103.3 kg/d, 유천천유역이 33.2 kg/d, 장전수위국 유역이 162.4 kg/d로 산정되었으며, 이중 비점오염비율은 동북댐 유역, 유천천 유역, 장전수위국 유역이 각각 68%, 61%, 66%로 분석되었다. 한편 동북댐 유역, 유천천 유역, 장전수위국 유역의 T-P 배출부하량과 비점오염비율은 각각 8.7 kg/d과 60%, 3.0 kg/d과 53%, 14.4 kg/d과 56%로 산정되었다.

3.2. 유역모형과 모형구축

3.2.1. 유역모형 선정

최근 들어 유역관리자에게 유용한 새로운 모형의 시스템 개발이 이루어지고 있으며, 이러한 시스템의 주요한 특징은 사용하기 쉬워야 하고, 모형들 간의 연계가 가능해야 한다. 또한 모형과 모형에 필요한 Database와 GIS 연계가 가능해야 하며, 사용자가 원하는 분석을 쉽게 지원해야 한다.⁸⁾

모형자체의 알고리즘 개발과 기존 모델의 보완이 꾸준히 이루어지고 있는 반면, 현재 유역모형 혹은 수질모형에 대한 연구 및 개발활동의 많은 부분은 모형사용자와 시스템과의 상호작용에 초점을 맞추고 있다. 모형개발에 있어서 Graphical User Interface (GUI)를 이용한 인터페이스 적용은 모형에 필요한 자료의 입력과 모형결과의 분석, 보·검증과정을 더욱 용이하게 하였다. 가장 널리 사용되고 있는 모형 즉, SWMM, HSPF, SWAT 등에 GUI를 꾸준히 개발하고 있다.

그리고 GIS의 발전은 모형분야에 큰 영향을 주었고, GIS는 유역모형 혹은 수질모형의 모의에 필요한 자료의 전처리에 탁월한 기능을 가지고 있다. 최근 들어서는 많은 모형들이 GIS와 밀접하게 연계되어 GIS 기반하에 자료의 수정과 모형의 결과 분석을 용이하게 하였다. GIS 연계의 또 다른 예가 방대한 자료를 관리하고 다양한 모델들을 지원해 주는 통합관리시스템이며 가장 대표적인 예로 BASINS를 들 수 있다. 이러한 시스템의 목적은 모형의 전처리와 분석 및 모형의 적용을 하나의 시스템 내에서 완전히 통합하는데 있다.

BASINS는⁹⁾ 유역오염 분석 및 관리를 위해 개발되었기 때문에 미국 오염총량(TMDL, Total Maximum Daily Loads)에 적용하여 이용되었고, 기존의 방식은 유역개념의 오염관리에서 자료의 전처리, 정보의 요약, 지도와 표 생성, 모형적용 등과 같은 일련의 과정이 각각 분리되어 여러 가지 Tool과 Software 등을 이용하여 실시하였다. 그러나 이러한 분리된 과정은 정보를 통합하는데 Program 상에 어려움이 있으며 많은 시간과 노력을 필요로 하였다. 그러나 BASINS는 사용자가 친숙한 Window Interface를 기반으로 하기 때문에, 환

Table 1. Pollutant loads discharged from Dongbok stream watershed

Division		Point pollutant loads		Non-point pollutant loads		Total pollutant loads (kg/d)
		Pollutant loads (kg/d)	Share ratio	Pollutant loads (kg/d)	Share ratio	
Dongbok dam watershed (ST-1)	BOD	42.9	0.34	82.7	0.66	125.6
	T-N	33.5	0.32	69.8	0.68	103.3
	T-P	3.5	0.40	5.2	0.60	8.7
Yuchun stream watershed (ST-3)	BOD	23.3	0.48	24.8	0.52	48.2
	T-N	13.0	0.39	20.2	0.61	33.2
	T-P	1.4	0.47	1.6	0.53	3.0
Jangjun water gauging station (ST-2)	BOD	88.5	0.41	128.4	0.59	216.9
	T-N	56.1	0.34	106.3	0.66	162.4
	T-P	6.3	0.44	8.1	0.56	14.4

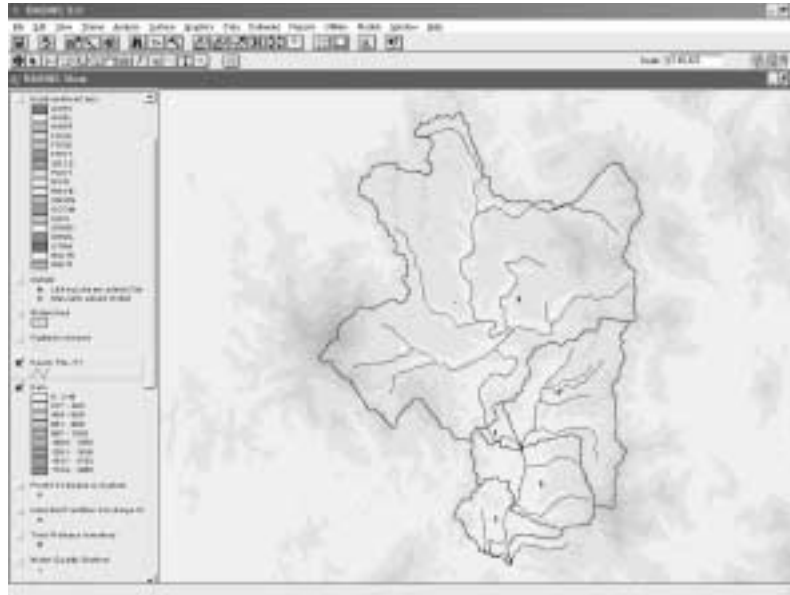


Fig. 3. Map of Dongbok stream lines.

경적인 정보를 손쉽게 검색할 수 있고, 분석을 위한 여러 가지 Tool을 제공하며, 다양한 유역모형과 수질모형을 시스템 내에서 실행할 수 있으므로, 유역의 분석시간을 줄이며 다양한 정보를 효율적으로 손쉽게 획득할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 많은 유역모형 중에서 시간별, 일별 유량·수질 모의가 가능하고, 유출부하량 산정이 용이한 BASINS/HSPF를 동북천 유역에 적용하여 모의하였다. BASINS/HSPF 모형의⁹⁾ 장점은 환경적인 정보 분석이 용이하고 모형들 간에 필요한 Database와 연계가 가능하며, 유역 오염원 관리기법을 평가하는 틀을 제공하고 있다. 또한 BASINS/HSPF는 동북면 소재지를 포함하고 있는 동북천 유역과 같이 농촌과 도시의 혼합지역에 적용이 용이하다.

3.2.2. 모형구축

BASINS/HSPF의 구축은 대상유역의 유역도, 하천도, 수치지고도 모형, 토지이용도, 기상자료(WDM)뿐 아니라 이들 자료를 이용하여 Win/HSPF를 구축하는 것을 의미하는데, 이들을 구분하여 좀 더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

3.2.2.1. 유역도 및 하천도

동북천 유역도는 ArcView GIS 기반인 BASINS 상에 있는 유역도 파일과 같은 Table의 속성으로 변환하여 작성하였고, 소유역은 총 5개의 소유역으로 분할하였다. 수질·유량 측정 말단지점인 장전교 하류를 제외한 동북천의 총 유역 면적은 262.09 km²이며, 소유역별 면적을 보면 동북면 유역은

180.96 km²로 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며, 동북면 소재지를 포함한 유천천 유역이 40.24 km²로 나타났다.

동북천의 경우 상류에 동북댐이 있고, 댐 하류에서 유천천이 합류한 후, 구암천, 평촌천 등과 합류하여 주암호로 유입된다. 장전교까지 동북천의 유로연장은 약 27.6 km이며, 지류인 유천천이 약 11.30 km이다. 그리고 하천도의 경우에는 Table 속성이 QUAL2E의 테이블 속성을 그대로 이용하여 하천도 파일을 생성한다. BASINS에서의 하천도는 BASINS와 QUAL2E모형을 적용하거나, Automatic Delineation Utility의 Burn in option을 적용하여 생성되며, Fig. 3은 동북천의 하천도이다.

3.2.2.2. 수치지고도 모형

동북천 유역에 적용한 수치지고도 모형(Digital Elevation Model; DEM)은 국토지리정보원에서 제공받은 것으로서 경위도 10 m 크기의 격자로 설정하여 구축된 자료를 이용하였으며, 이것은 대상지역을 격자로 나누고, 각 격자의 평균 고도값과 각각 격자간의 위상관계를 포함하고 있어, 대상지역의 지형을 표현할 수 있는 수치자료이며, 대상유역의 하천흐름도와 유역기울기 등을 나타낸다.

BASINS에서의 수치지고도 모형은 Automatic Delineation Utility를 이용한 소유역 분할시 이용되며, 유역모형 적용 시 중요한 자료이고, 이것을 이용하여 새롭게 생성된 유역도의 면적 및 유역 평균경사, 유역 폭, 유역 길이, 하천 길이, 하천 평균경사, 하천 폭 등과 같이 지형학적인 인자를 추출할 수 있다.

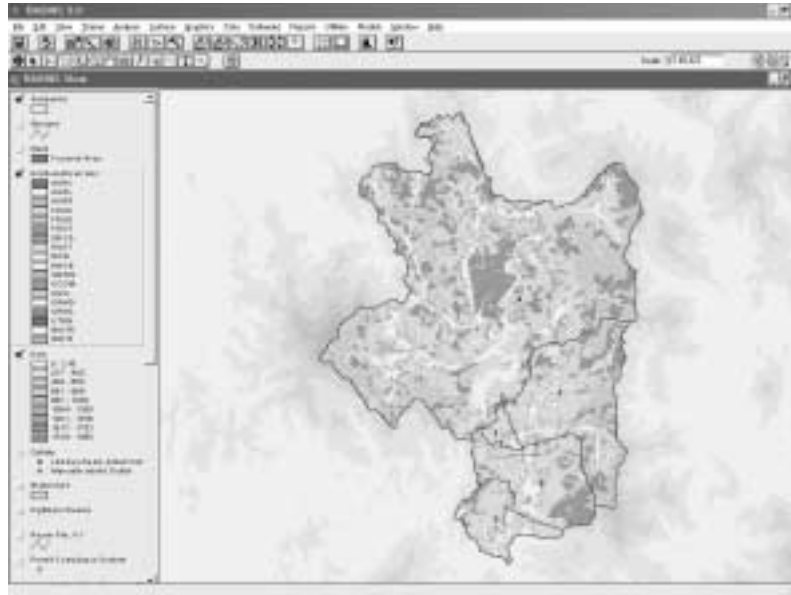


Fig. 4. Landuse chart of Dongbok stream watershed.

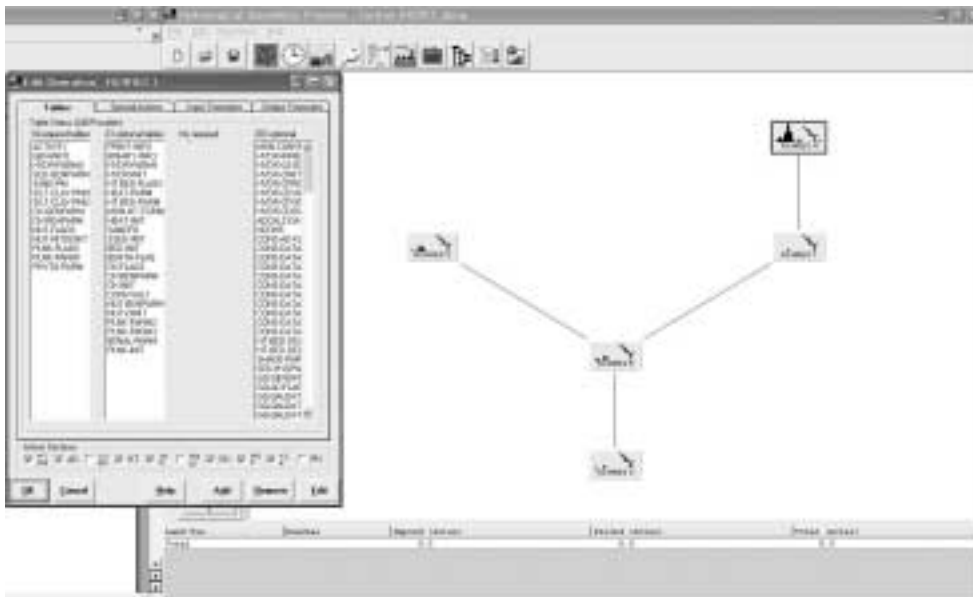


Fig. 5. HSPF construction for Dongbok stream.

3.2.2.3. 토지이용도

BASINS에서의 토지이용도는 Landuse and Soil Definition Utility를 이용하여 토지이용도를 중첩시킴으로써 분할된 소유역에 대한 각각의 토지이용정보를 추출하는데 사용한다. 자료의 형태는 ArcView의 Shapefile, Grid 형태로 이용하며, 토지이용도 자체 내에 토지이용도 코드 및 Description를 설정하여 소유역별 토지이용형태를 지정해 준다. Fig. 4는 동북천 유역의 토지이용도이다.

3.2.2.4. 기상자료 및 Win/HSPF 구축

HSPF의 적용을 위해서는 기상자료를 WDM파일 형태로 저장해야 하며, 본 연구에서는 동북천 유역에서 가장 가까운 순천관측소에서 관측한 2002~2004년의 시간별 기온, 강수량, 일조량, 전운량, 이슬점온도, 증발량, 증산량, 풍속 등의 기상자료를 WDM파일 형태로 변환하여 구축하였다.

Win/HSPF를 구축한 결과는 Fig. 5에 나타냈으며, 이 그림에서와 같이 동북천 유역을 5개 소유역으로 나누었고, 동북댐 유역과 동북댐 하류에서 유천천 합류 전 유역, 유천천 유역, 합류 후 총량단위유역인 동북A 측정지점까지의 유역, 그리고 동북천 하류인 장전수위국까지의 유역으로 구분하여 구축하였다.

Table 2. Measurement date of flow, rainfall and water quality

Dry Days		Rainy Days		
year-month-day. hour		year-month-day. hour	Rainfall(mm)	Note
03-07-16. 18 ~ 03-07-17. 12		03-07-17. 12 ~ 03-07-18. 21	36.2	Dongbok dam overflow
03-08-23. 18 ~ 03-08-24. 12		03-07-28. 16 ~ 03-07-29. 18	26.5	Dongbok dam overflow
03-09-17. 12 ~ 03-09-18. 06		03-08-10. 20 ~ 03-08-11. 18	20.5	
03-10-10. 18 ~ 03-10-11. 12		03-08-24. 18 ~ 03-08-26. 12	64.9	Dongbok dam overflow
03-11-07. 18 ~ 03-11-08. 12		03-09-18. 12 ~ 03-09-19. 18	26.7	Dongbok dam overflow
03-12-02. 18 ~ 03-12-03. 12		03-10-13. 03 ~ 03-10-15. 00	25.0	
04-07-29. 18 ~ 04-07-30. 12		04-06-16. 18 ~ 04-06-18. 18	41.0	
04-08-29. 18 ~ 04-08-30. 12		04-06-24. 18 ~ 04-06-25. 12	20.8	
04-09-30. 12 ~ 04-10-01. 06		04-07-07. 03 ~ 04-07-08. 12	46.6	
04-10-14. 13 ~ 04-10-15. 07		04-07-14. 00 ~ 04-07-16. 12	159.8	
04-11-20. 12 ~ 04-11-21. 06		04-09-11. 00 ~ 04-09-15. 00	101.1	Dongbok dam overflow
04-12-09. 12 ~ 04-12-10. 06		04-11-10. 12 ~ 04-11-11. 18	64.8	

3.3. 모형의 보정·검증 결과

BASINS/HSPF 모형의 보정·검증에는 2003년과 2004년에 강우량 20 mm 이상의 강우가 발생하였을 때 실측하였던 동복천 유량 및 수질농도가 이용되었다.^{1,2)} 그 이유는 강우시 동일지점에서 유출유량 및 수질의 측정횟수가 비교적 많아, 본 연구의 유황별 비점유출부하량 산정방법의 적용성을 검토하는데 필요한 기초자료량으로서 양호하다고 판단하였기 때문이다. Fig. 2에서 보여진 바와 같이 강우시 실측지점은 동복댐 하류에 위치한 연월교(ST-1)와 장전 수위국이 위치한 장전교(ST-2)로서 총 2개 지점이며, 비강우시의 경우에는 유천천이 동복천에 합류되기 직전의 지점(ST-3)을 추가하여 총 3개 지점이다.

시료채취 일자, 기간 및 강우량은 Table 2에 나타내었다.

강우시의 하천유량과 수질은 강우가 발생하기 약 2시간 전부터 강우가 끝나고 강우전 유량이 될 때까지 강우중에는 0.5~2시간, 강우후에는 3~12시간 간격으로 2003년과 2004년에 각 6회씩 총 12회 실측한 것이며, 각 실측지점의 회당 시료채취는 10개 이상으로서 실측지점당 총 시료수는 120개 이상이었다. 비강우시의 경우에도 강우시와 마찬가지로 2003년과 2004년에 각 6회씩 총 12회 실측한 것이며, 각 실측지점의 회당 시료채취는 1개였다.

BASINS/HSPF 모형의 보정·검증은 ST-1, ST-2 및 ST-3 지점들 각각에 대해 실시하였으며, 보정·검증의 순서는 강우와 관계가 있는 유출유량이 첫 번째였고, 그 다음으로 수온, DO, BOD, NO₃-N, T-N, T-P의 순이었다. BASINS/HSPF 모형의 보정은 2003년 자료를 이용하였고,

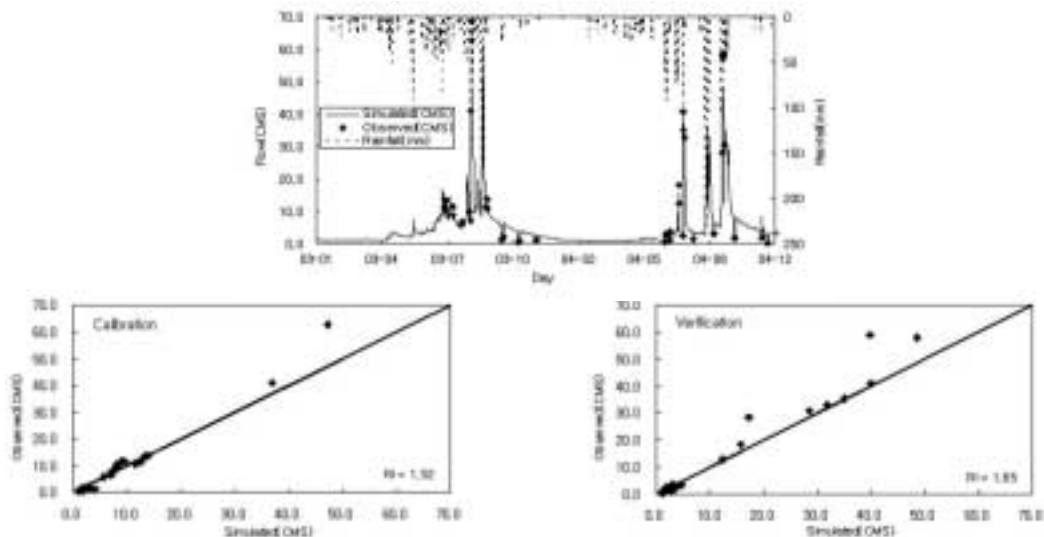


Fig. 6. Daily flow observations and model estimate results.

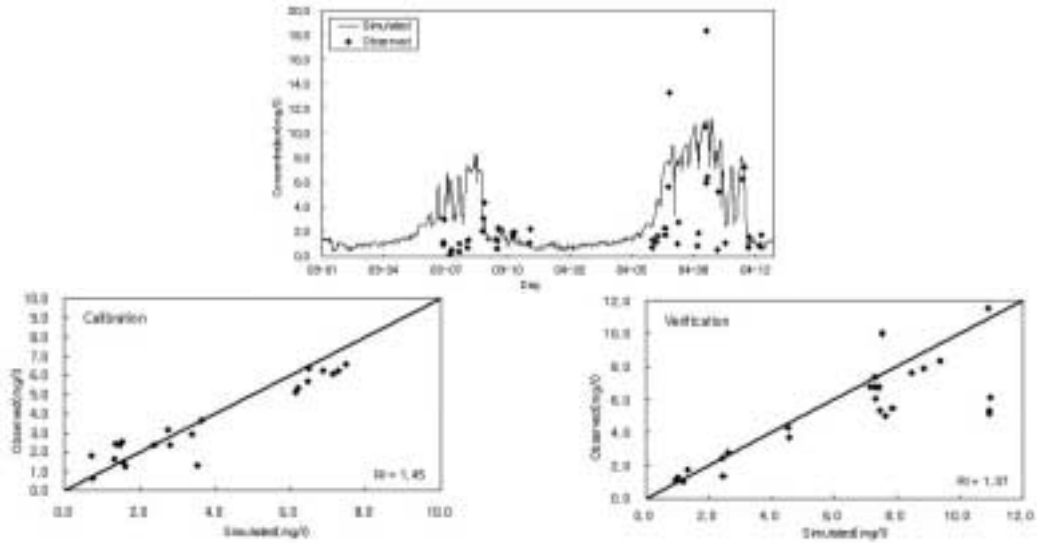


Fig. 7. Daily BOD observations and model estimate results.

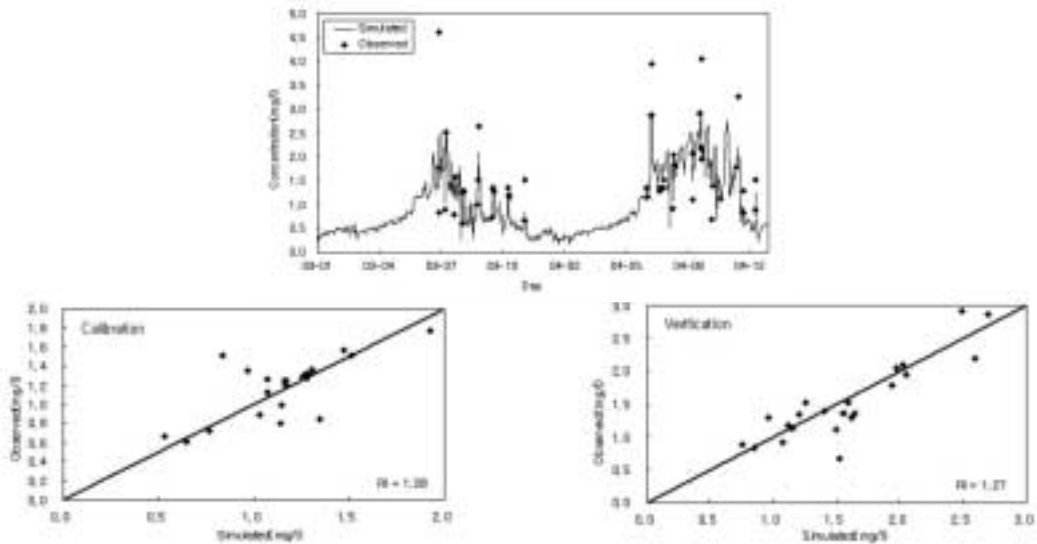


Fig. 8. Daily T-P observations and model estimate results.

Table 3. Estimate of non-point pollutant delivery load for reference flows

Reference flows	Flow (CMS)	Non-point BOD		Non-point T-P	
		Delivery load (kg/d)	Delivery ratio	Delivery load (kg/d)	Delivery ratio
Dry Season	0.796	45.9	0.36	8.8	1.09
Low Season	1.583	105.5	0.82	17.7	2.19
Normal Season	3.200	772.9	6.02	136.9	16.90

검증은 2004년 자료를 사용하여 실시하였다.

모형변수의 보정작업은 실측치와 예측치의 값이 최대한 유사하여질 때까지 실시하였으며, 이들의 유사성은 다음의 식에 나타난 신뢰도지수(RI : Reliability Index)의 값을 구함으로써 판단할 수 있다.¹⁰⁾

$$\text{신뢰도지수 RI} = \frac{1 + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{[1 - (Y_{tn} / X_{tn})]^2}{1 + (T_{tn} / X_{tn})^2}}}{1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{[1 - (Y_{tn} / X_{tn})]^2}{1 + (T_{tn} / X_{tn})^2}}} \quad (2)$$

여기에서 X=모의값(예측값), Y=실측값, N=비교한 수질항목(X,Y)조의 수, T=실측회수(Sampling Frequency)이다.

신뢰도지수 RI($RI \geq 1$)의 값이 1에 가까울수록 실측값과 예측값의 값은 유사하며, 반대로 1에서 멀어질수록 실측값과 예측값의 차이는 큰 것이다. 보통 RI가 3 이상이면 유사성이 양호한 것으로 판단하고 있다.¹⁰⁾

연구대상 지역의 대표지점인 장전교(ST-2)에 대해 수행한 유출유량과 오염총량 대상물질인 BOD, T-P를 중심으로 본 논문의 모형 보정·검증의 결과(Fig. 6~Fig. 8)를 설명하면 다음과 같다. BASINS/HSPF 모형의 유출유량에 대한 보정은 총 유출유량과 침투유량에 대하여 변위가 큰 변수부터 보정하였는데, 그 순서는 LZSN, INFILT, AGWRC, UZSN, DEEPER, LZETP, INTFW, IRC 등이었다. 장전교(ST-2)의 유출유량에 대한 보정·검증 결과는 Fig. 6에 보여지며, 보정과 검증시의 신뢰도지수 값은 각각 1.52와 1.65로서 실측값과 예측값의 유사성이 높게 나타났다. 유출유량의 예측값은 시간단위로 모의하였으나, 실측값이 매 시간단위로 측정이 이루어진 것이 아니기 때문에 일단위로 변환하여 유출유량의 신뢰도 지수값을 구하였다.

한편 강우 사상별 강우의 진행에 따라 장전교 상류에 위치한 동복댐의 월류가 있으면 유출유량이 높게 산정되고 댐의 월류가 없으면 강우량이 많아도 유출유량이 낮게 산정되는 경우도 나타났다.

수질관련 모형변수의 보정작업에서 BOD는 BODOX, KBOD20, TCBOD, TW, BOD 순으로 실시하였으며, T-P는 유기인과 무기 인산염의 예측값들을 더한 것으로서 SNUT, DNUT, ADPM 순으로 실시하였다.

보정·검증의 각각에 대한 신뢰도 지수값은 BOD 1.45와 1.37이고 T-P 1.28과 1.27로서 실측값과 예측값의 유사성은 높게 나타났다. 실측치와 예측치의 차가 발생하는 주요 원인은 강우강도에 따라 하천수질의 변화가 크나, 강우강도별 유달시간이 달라, 강우강도 측정시간과 이때의 유출수가 측정지점에 도달하는 시간에 맞춰 시료를 채취하기 곤란하기 때문이다.

3.4. 유황별 비점오염 유달부하량 산정 결과

장전교(ST-2)의 유황별 기준유량은 수자원공사의 장전수 위국에서 측정된 2003년과 2004년의 일 평균수위 자료와 이 지점의 수위-유량 곡선식을 이용하여 산정하였다(Table 3).

BASINS/HSPF 모의결과로서 나타나는 일별 BOD, T-P 농도들을 Fig. 1의 절차에 따라 유황별로 분류하고, 이를 비점오염유달부하량 산정식[식 (1)]에 대입하여 장전교 지점의 유황별 갈수기, 저수기, 평수기의 비점오염유달부하량을 산정하였다. 모형의 모의기간 동안에 갈수기(0.796 CMS±5%), 저수기(1.583 CMS±5%), 평수기(3.200 CMS±5%)에

해당하는 수질자료의 수는 각각 70개, 37개, 70개였다.

장전교 지점의 유황별 비점오염유달부하량(Table 3)을 살펴보면, 연간 일평균 비점배출부하량(Table 1)과 대비하여 갈수기는 BOD 0.36과 T-P 1.09, 저수기는 BOD 0.82와 T-P 2.19, 평수기는 BOD 6.02와 T-P 16.90이다. 연간 일평균 비점배출부하량과 유사한 시기가 BOD는 저수기이고 T-P는 갈수기인 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 수계유역 특성에 따라 다르게 나타날 수 있다. 따라서 오염총량관리계획 수립시에는 수계 특성에 따라 이와 같은 유황별 비점유달부하량의 차이를 산정하여 반영할 필요성이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유역모형인 BASINS/HSPF와 연계하여 비점유달부하량을 유황별로 산정하는 방법을 개발하고, 이를 전남지역에 위치한 동복천 유역에 적용하여 그 효용성을 평가한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 동복천 유역에 대한 BASINS/HSPF 모형의 유출유량, BOD 및 T-P의 평균 신뢰도지수는 각각 1.59, 1.41, 1.28로서 실측값과 예측값의 유사성은 양호하게 나타났다.
- 이러한 신뢰지수를 갖는 BASINS/HSPF 모형을 사용하여 동복천 유역의 갈수기, 저수기, 평수기에 대한 BOD와 T-P의 비점유달부하량을 구하여 보면, 연간 일평균 비점배출부하량과 대비하여 0.36과 1.09, 0.82와 2.19, 6.02와 16.90이었다.
- 이러한 결과는 비점유달부하량이 유황별로 매우 다르다는 것을 나타내기 때문에, 오염총량관리계획 등을 수립할 때 유역모형을 사용하여 기준유량별 비점유달부하량을 서로 다르게 산정하여 반영할 필요성이 있다.
- 따라서 이러한 경우에 본 연구에서 BASINS/HSPF와 연계하여 개발한 유황별 비점오염유달부하량 산정방법은 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

KSEE

사 사

이 논문은 2007년도 전남대학교 연구년 교수연구비와 2008년 국립환경과학원(영산강·섬진강수계 수질오염총량관리 유황별 유달을 산정방법 연구)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국수자원공사, “주암댐 비점오염물질 유입특성 및 저감방안(1차년도),” (2003).
2. 한국수자원공사, “주암댐 비점오염물질 유입특성 및 저감방안(2차년도),” (2004).
3. 정재운, 윤광식, 주석훈, 최우영, 이용운, 류덕희, 이수웅, 장남익, “회귀식을 이용한 황룡A 유역에서의 유황별 유달을 산정,” 한국농공학회논문집, **51**(6), (2009).
4. U.S.DA, “Soil and Water Assessment Tool Theoretical Document, User’s Manual Version 2000,” (2002).
5. U.S.EPA, “WinHSPF Version 2.0, An Interactive Windows Interface to HSPF(WinHSPF) User’s Manual,” (2001).
6. U.S.EPA, “Storm Water Management Model, User’s Manual Version 5.0,” (2005).
7. 국립환경과학원, “제 2단계 수계 오염총량관리기술지침,” (2008).
8. 송광덕, “BASINS/HSPF와 연계한 유황별 비점유달부하량 산정방법 개발에 관한 연구,” 전남대학교 박사학위논문, (2009).
9. U.S.EPA, “Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources, BASINS Version 3.0-User’s Manual,” (2001).
10. 농업기반공사 농어촌연구원, “해남지구 담수호 수질보전대책 조사연구 보고서,” (2000).