

유역모형을 이용한 낙동강 유역에서의 비점오염원 정량화**Non-point Source Quantification Analysis Using SWAT in
Nakdong River Watershed****황보현* / 김동일** / 윤영삼*** / 한건연******

Hwang Bo, Hyun / Kim, Dong Il / Yoon, Young Sam / Han, Kun Yeun

Abstract

Recent urbanization and abnormal weather have induced enormous changes in the characteristics of both runoff and pollutant occurrence. Thus, sophisticated watershed modeling of water quality is required. In order to manage non point sources in a watershed, quantitative analysis should be preliminarily performed. However, it is difficult to conduct quantitative analysis since complex natural phenomenon need to be reflected in the modeling. Also, travel time analysis for pollutants and separation of point and non point sources are not easy to carry out. The objective of this study is to quantify non point sources in watershed using soil and land use map and to make the full use of the results in managing non point sources. To do this, non point sources are quantified using a watershed model, SWAT (Soil and Water Assessment Tools). The result of study conform with result of National Institute of Environmental Research.

Keywords : non-point source quantification, watershed model, SWAT**요 지**

최근 들어 도시화와 이상기후의 영향으로 유역에서의 유출특성과 오염물질 발생특성도 변화하고 있고 이에 따라 정교한 유역 수질분석이 요구되고 있다. 유역의 비점오염원 관리를 위하여 충분조건을 갖추어야 할 정량분석이 선행되어야 하나 점오염원 관리와 달리 자연 내의 복잡한 현상을 반영하여야 하기 때문에 비점오염원의 정량화 해석에 어려움을 겪어왔다. 강우 및 유출량 관계와 덧붙여 오염물질이 하천수질에 영향을 미치기까지 도달시간 해석 및 점오염원과 비점오염원의 분리가 용이하지 않기 때문이다. 본 연구의 목적은 토양도, 토지이용도 자료 등을 이용하여 유역의 비점오염원을 정량화하고, 비점오염원 관리를 위한 기반자료로 활용하기 위함에 있다. 이를 위하여 유역모형 SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 모형을 이용하여 비점오염원 정량화를 수행하였다. 유역의 비점오염원 비율은 국립환경과학원에서 조사된 비점오염원 비율인 22~37% 정도와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

핵심용어 : 비점오염원 정량화, 유역모형, SWAT

* 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 석사과정

Master Course, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: ghkdqh0@nate.com)

** 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 박사과정수료

Corresponding author, Ph.D., Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: kdi5422@naver.com)

*** 낙동강물환경연구소 연구사

Environmental, Nakdong River Environmental Research Center, Goryung, Kyungpook 717-870, Korea (e-mail: ysyoons3@me.go.kr)

**** 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수

Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea (e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

1. 서론

하천과 호수를 오염시키는 발생원으로는 하·폐수 처리 시설로부터 배출되는 방류수와 같이 발생원의 경로 및 배출지점을 파악할 수 있는 점오염원과 강우 시 지표면유출과 함께 농경지, 삼림지, 도로면, 건물 그리고 하수관거에 축적되어 있던 오염물질이 배출되는 비점오염원으로 구분할 수 있다.

비점오염원에서의 오염물질은 대부분 강우 시에 유출되며 그 경로 또한 다양하고 복잡하므로, 비점오염원의 발생양상을 모의하고 이를 정량적으로 규명하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 강우 시 유출되는 비점오염원 부하가 수질에 끼치는 영향은 하수처리율이 향상되고 경제활동수준이 증가하고, 토지 이용이 고밀도로 이용될수록 높아지고 있다. 우리나라에서 배출되는 비점오염부하(BOD5)의 규모는 하수관거누수, 미처리 가축분뇨의 영향 등을 포함할 때 그 비중은 권역별로 42~69%에 달하며 2015년에는 65~70%까지 증가할 것으로 추정하고 있다.

우리나라 수질관리는 통상 생활하수, 공장폐수 등 점오염원을 중심으로 수질관리정책을 실시하여 왔으나, 오염물질의 상당량이 면오염원에서 유발되고 있는 것으로 확인되고 있다. 비점오염원에서 수질오염물질이 상수원 또는 하천으로 상당량 유입되고 있음을 인식함에도 불구하고 현재까지 비점오염원물질을 저감하기는 특별한 방안을 강구·시행하는데 어려움을 겪어오고 있다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 비점오염원 관리를 위한 선행조건인 정량화를 위하여 SWAT 모형을 이용하여 비교·분석하였다.

2. 유량 및 수질 지배방정식

2.1 유량 분석 알고리즘

유역모형에서 강우의 변화에 따른 유출거동은 지형, 지질적인 형태에 크게 영향을 받기 때문에 기상, 토양형태, 토지 이용 및 이용, 지형 및 지질자료 등을 이용하여 해석되며, 공간적인 수문성분의 분석을 바탕으로 하도 추적 및 저수지 추적 및 오염물질 하도 추적과정을 거쳐 시간적인 해석을 수행하게 된다. 하도 추적의 유입조건으로 이용되는 소유역별 유출량은 동일한 유출현상을 갖는 수문학적 반응단위(HRU; Hydrologic Response Unit)별로 되어 수문성분이 해석되며 이는 해당 소유역의 주하도 유입량으로 산정된다.

Fig. 1은 하나의 수문학적 반응단위에서 강수(PCP)로 인한 지표수(Q_{sur}), 토양수 또는 측방흐름(Q_{lat}), 침투량(Q_{sep}), 지하수 함양량(Q_{rcrg}), 지하수(Q_{gw}), 증발산량(ET) 등의 수문성분 거동형태를 도시한 것이다. SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 모형에서는 수정 SCS 방법을 이용하여 지표수를 산정하고 강수량에서 지표수를 뺀 나머지 양은 토양표면 아래로 침투되도록 모형화 되었다. 이 양은 기존 토양수분량에 추가되고 최대보유수량(field capacity)을 초과하는 토양수분량은 중력수로 정의되어 측방흐름과 침투량으로 이동하게 된다. 나머지 토양수분량은 식생과 기상조건에 따라 영구위조점(permanent wilting point)에 도달할 때까지 모관수로 정의되어 증발산으로 토양층 내에서 제거된다. 마지막 토양층에서의 침투량은 지하수함양량으로 얕은 대수층(shallow aquifer)에 저장되어 있는 지하수에 추가된다. 이 양 중 일정부분은 하천으로 회귀하는 지하수로, 또는 깊은 대수층(deep aquifer) 및 토양층으로 이동한다. 이러

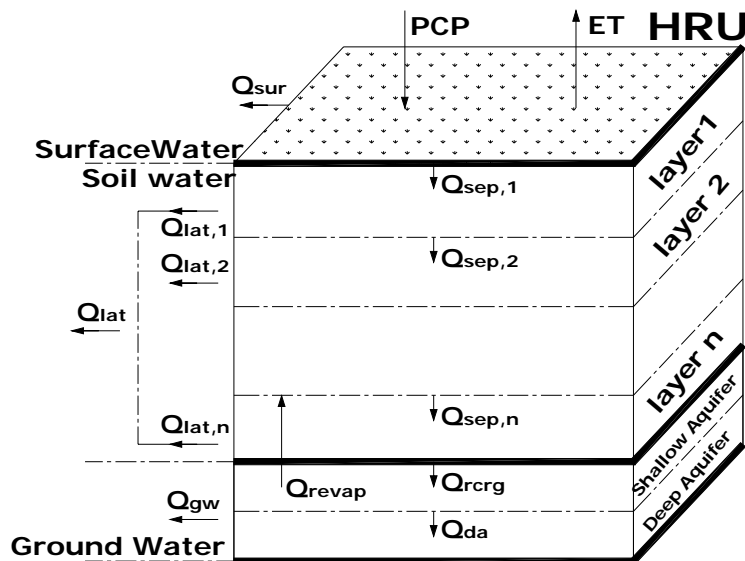


Fig. 1. Schematic Representation of the Hydrologic Cycle

한 과정을 바탕으로 한 토양수분 변화량에 따른 기본적인 물수지 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\Delta SW = P - Q - ET - DP - QR \quad (1)$$

여기서, SW는 토양 함수량, P는 강수량, Q는 유출량, ET는 증발산량, DP는 침투량, QR은 하천으로의 회귀수를 나타낸다.

2.2 수질 분석 알고리즘

탄소성 생화학적 산소 요구량(CBOD)는 지표 유출에서 이송되는 유기성물질을 분해하는데 필요한 산소를 이르며 최종 CBOD에 대한 부하함수는 Eq. (2)와 같이 Thomann and Mueller (1987)에 의해 제시된 관계를 기반으로 하여 산정된다.

$$cbod_{surq} = \frac{2.7orgC_{surq}}{Q_{surf}A_{hru}} \quad (2)$$

여기서, $cbod_{surq}$ 는 지표 유출에서의 BOD농도(mg CBOD/l)를 나타내고, $orgC_{surq}$ 는 지표 유출에서의 유기성 탄소(kg OrgC), Q_{surf} 는 지표 유출량(mmH₂O), A_{hru} 는 수문학적 반응 단위의 면적(km²)을 나타낸다.

지표 유출에서 유기성 탄소의 양은 Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$orgC_{surq} = 1000 \frac{orgC_{surf}}{100} \cdot sed \cdot \epsilon \quad (3)$$

여기서, $orgC_{surf}$ 는 토양 상층 10 mm에서의 유기성 탄소의 분율(%), sed 는 수문학적 반응 단위로부터 이송되는 유사량(톤), ϵ 은 탄소 농축비를 나타낸다. 여기서 탄소 농축비는 유사에 부착되는 유기성 탄소 농도의

농도비로 정의되며 유사농도에 대한 Menzel (1980) 경험식을 이용하여 산정된다.

각 수문학적 반응 단위로부터 발생한 유기성 탄소는 하도 내에서 추적과정을 통하여 특정 위치에서의 농도를 산정한다. SWAT 모형에서 사용하고 있는 오염물질 전달 과정은 QUAL2E 모형의 메커니즘으로부터 적용되었다. (Brown and Barnwell, 1987)

$$\Delta cbod = -(K_1cbod + K_3cbod)TT \quad (4)$$

유기성 탄소는 Eq. (4)의 메커니즘을 통하여 추적되며, Eq. (4)는 물이 하류로 흐르는 과정에 자체 분해 및 침전에 의하여 농도변화가 일어난다는 것을 의미한다. 여기서, K_1 은 CBOD 분해율(일⁻¹), K_3 은 CBOD 침전율(일⁻¹)을 나타내며, TT 는 도달시간(일)을 나타낸다.

3. 비점오염원의 정량화

비점오염원 관리를 위해 비점오염원만을 위한 수질 관측이 수행되고 있다면 하천수질이 지금보다 양호한 상태로 유지할 수 있으나, 사실상 현실적으로 불가능하기 때문에 유역모형을 이용하여 비점오염원 정량화를 수행하였다. 관측되는 하천수질은 점 및 비점오염원에 따라 변동하는 것이 반영되므로, 점오염원을 포함하여 하천수질을 검·보정한 후 점오염원을 제거하는 방식으로 비점오염원 정량화를 수행하였다.

SWAT 모형을 통한 하천수질의 비점오염원 모형화 과정은 Fig. 2와 같은 개념도로 진행되었다.

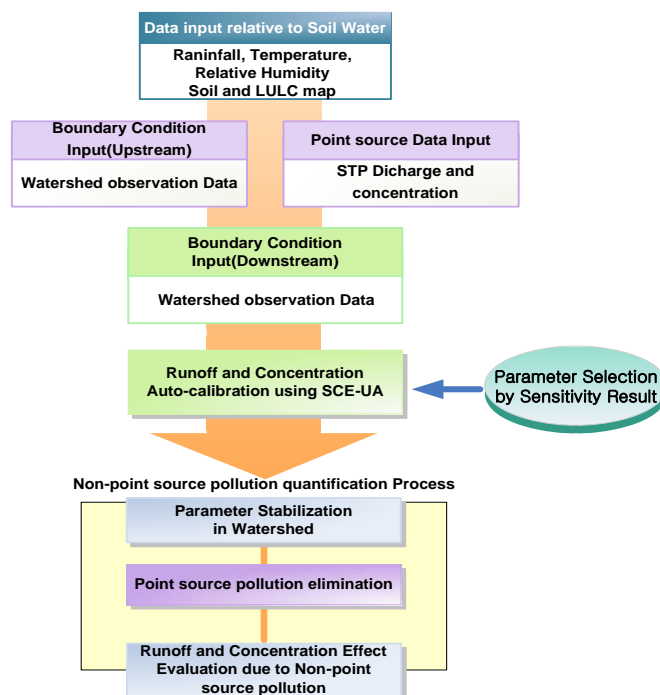


Fig. 2. Schematic of Non-point Source Pollution Quantification Using SWAT

본 연구에서 비점오염원을 산정하는 방법은 우선, 유역 내의 어떤 점오염원배출시설이 있으며 또한 그곳에서 얼마만큼의 점오염원을 배출하는지 조사하여 SWAT의 입력자료로 구성을 하였다. 이는 연구의 대상유역인 낙본_D, 낙본_E, 낙본_H의 점오염원자료를 조사한 후 입력하여 SWAT 모의를 진행하고 그 결과를 실측치와 검·보정 하였다. 이렇게 모의를 한 후 모의된 SWAT에서 점오염원을 제외하여 비점오염원의 영향을 평가하는 방식을 적용하였다.

입력자료로 강우, 기상 자료 및 토지이용도와 토양도를 이용하고, 상류단으로부터 유입되는 지점의 유량자료를 상류단 조건으로 입력하여 유출모의를 수행하였으며 수질 모의를 위해 단위유역 내에 존재하는 환경기초시설의 방류유량 및 수질 자료를 입력하였다(환경부, 낙동강물환경연구소, 2006). 또한 강우자료는 우리나라와 같이 강우양상이 국지적으로 발생하는 특성을 고려하여 티센망을 이용한 면적평균값을 적용하였으며, 토양도 및 토지이용도는 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도와 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도를 이용하였다.

위에서 언급된 입력자료를 바탕으로 매개변수 보정을 민감도 분석 결과의 우선순위에 따라 surlag (지표면 유하 지체계수), SOL_AWC (각 토양층의 가용 토양수분능), ESCO (토양 증발산 보상계수)를 SCE-UA 기법에 의해 수행하였다. 본 연구에서 적용된 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-UA) 기법은 유전자 알고리즘의 일종으로 재생, 교배, 돌연변이의 과정을 통해 목적함수를 최적화하도록 설계되어 있다 (Duan and Gupta, 1994).

3.1 낙본 D 유역의 비점오염원 정량화

3.1.1 유역 모의 자료

낙동강수계 총량관리단위유역 중 낙본 D 단위유역에 대한 모의를 수행하였다. 낙본 D 단위유역은 낙동강 수계 구간 중 안동시와 예천군 경계점 후부터 낙동강 합류점까지 전 구간 및 유역으로써, 낙동강유역의 중류부에 해당된다. 유역의 전체적인 형상은 아래 그림과 같다. 유역의 상류 입력 조건은 낙본 C 단위유역 모의 결과를 입력하였고, 낙본 최종 유출구는 낙본 D 말단지점으로 설정하였다. 또한, 금천 A, 영강 A, 이안 A, 병성 A, 위천 B 단위유역에 대해 지류조건으로 입력하였다.

낙본 D 단위유역의 점오염원은 유역 내 하수종말처리장이 존재하지 않으며, 상주축산폐수처리사업소와 사벌목하마을하수도가 존재하고 있다. 따라서 본 연구에서는 점오염원의 정확한 산정을 위해 SWAT의 입력자료로 이들 자료에 대한 오염원자료를 제시하고 또한 각 소유역으로 구분을 하여 모의를 수행하여 보았다. 또한 수질모의는 2006년 자료가 존재함으로 이를 이용하여 모의를 수행

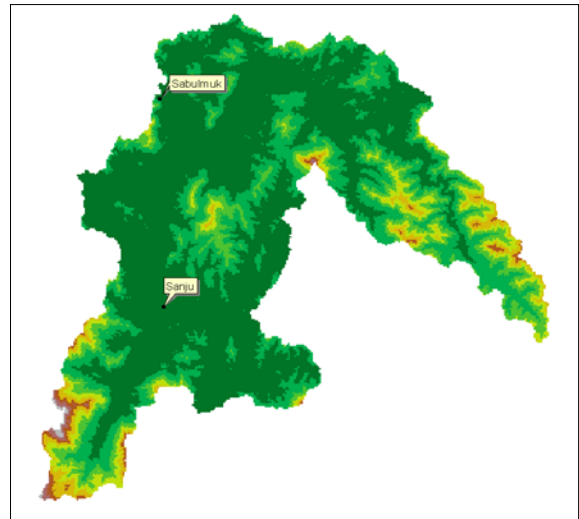


Fig. 3. GIS Map of Nakbon D Watershed

한다.

모의 대상 유역에 대한 입력 조건으로 낙본 C 단위유역 유출 유량 및 수질, 금천 A, 영강 A, 이안 A, 병성 A, 위천 B 단위유역에 대한 유출 유량 및 수질을 입력하였다.

3.1.2 낙본 D 유역에서의 비점오염원 정량화

낙본 D 단위유역의 말단지점을 검·보정 지점으로 선정하여 관측 유량 및 수질 자료를 검·보정을 수행하였다. 유량 민감도 분석에서 민감도 순위가 높은 순으로 3가지 매개변수를 선정하여 검·보정을 수행하였다. 구체적으로 CN2, surlag, SOL_AWC 매개변수에 대하여 유출수 문곡선과 검·보정을 실시하였다.

Figs. 4 and 5는 유역의 최종 유출구지점에서 점오염원과 비점오염원의 총량과 모의치를 비교한 그래프이다. 유량의 경우 관측치와 비교했을 때 첨두치가 실제보다 조금 높게 나타나는 현상이 나타나고 있으나 전체적인 추세와 비슷한 결과를 도출할 수 있었다. 또한 BOD 경우는 실측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 위와 같은 모의 결과를 이용하여 비점오염원의 정량화를 실시하고자 한다. 비점오염원의 정량화는 점오염원 배출 부하량을 포함한 모의 결과를 검·보정하고 그 모의에서 점오염원의 영향을 제외하여 모의한 결과가 비점오염원에 대한 영향이라고 판단하고 비점오염원의 정량화를 수행하였다.

현재 비점오염원에 의한 관측은 집수면적이 작은 유역에 대해서 지표수 수질 및 유량을 측정하고 있는 실정이다. 그러나 단위유역과 같은 면적이 넓은 지역의 비점오염원의 정량화는 단순한 지배 방정식의 도입으로 산정되는 것이 불가능하므로 Black Box 모형의 개념을 도입하여 비점오염원 정량화를 실시하였다. 유입 및 유출 조건

입력 후 파악하고자 하는 현상을 제외한 유입 조건을 제거한다면 관측이 어려운 현상을 간접적으로 해석하는 것이 가능하다. 본 연구의 목적은 비점오염원의 정량화에 있으므로 모든 유입 조건 및 유출 조건을 입력한 후 비점오염원 이외의 현상 즉 점오염원에 의한 유입 조건을 삭

제함으로써 비점오염원에 의한 정량화를 간접적으로 추정하였다. 아래 그림에서 점선으로 나타나는 부분이 비점오염원에 의한 유량 및 수질을 나타내며 실선부분이 점오염원과 비점오염원을 합한 총오염원에 의한 모의 결과이다.

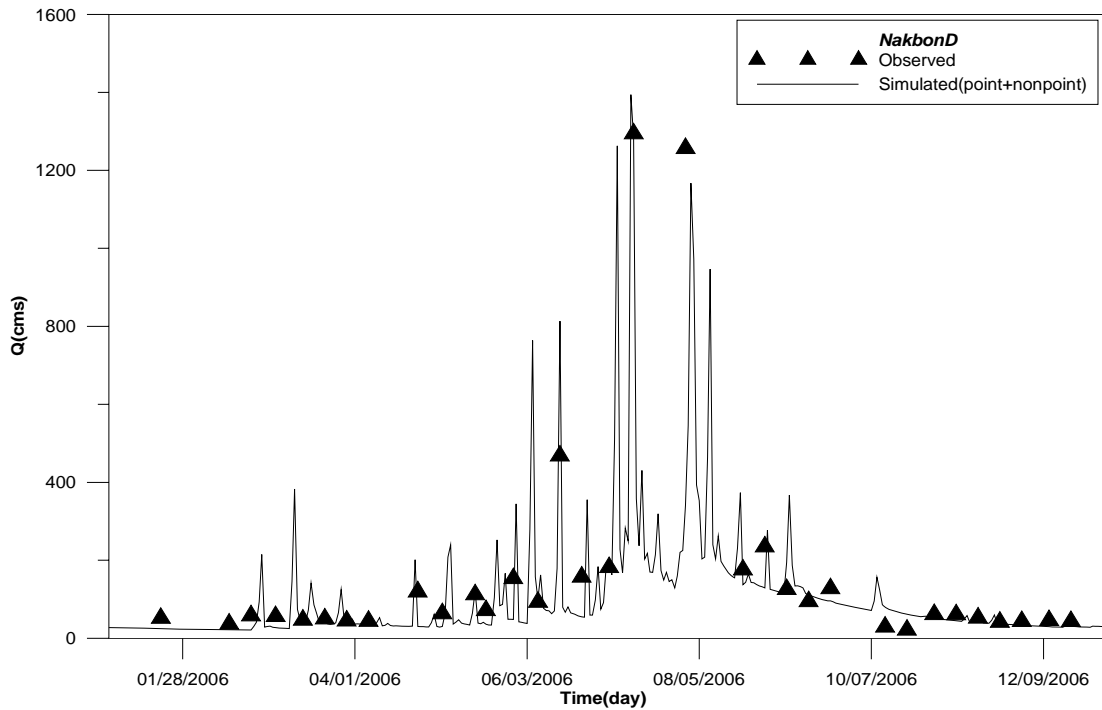


Fig. 4. Runoff Hydrograph

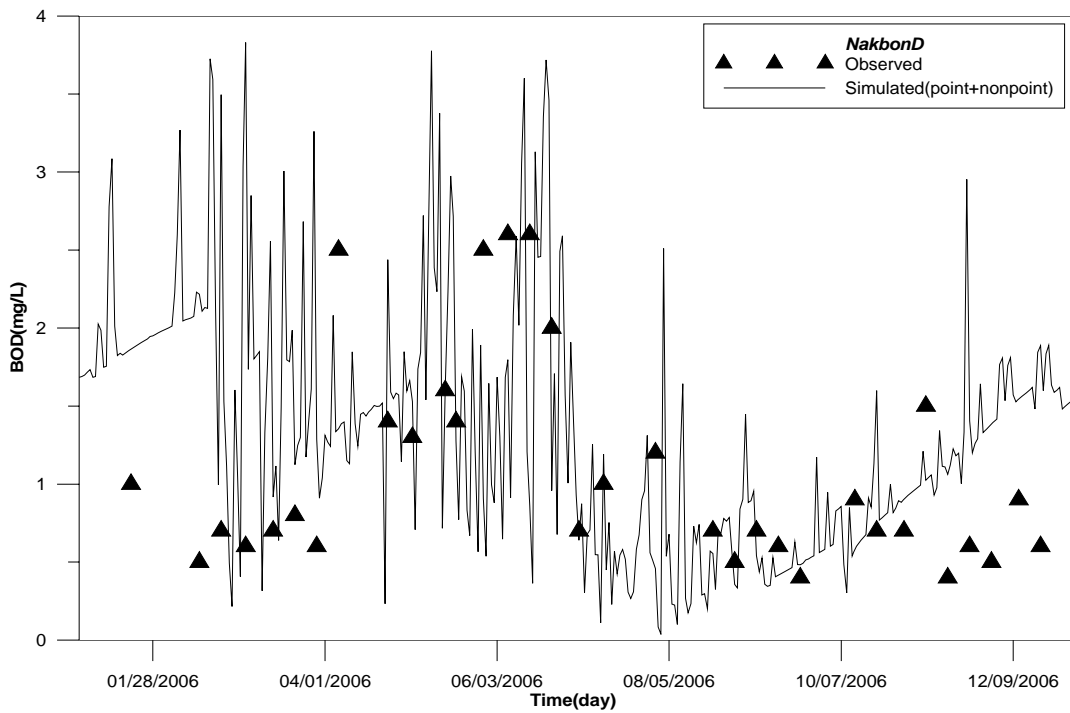


Fig. 5. BOD Concentration

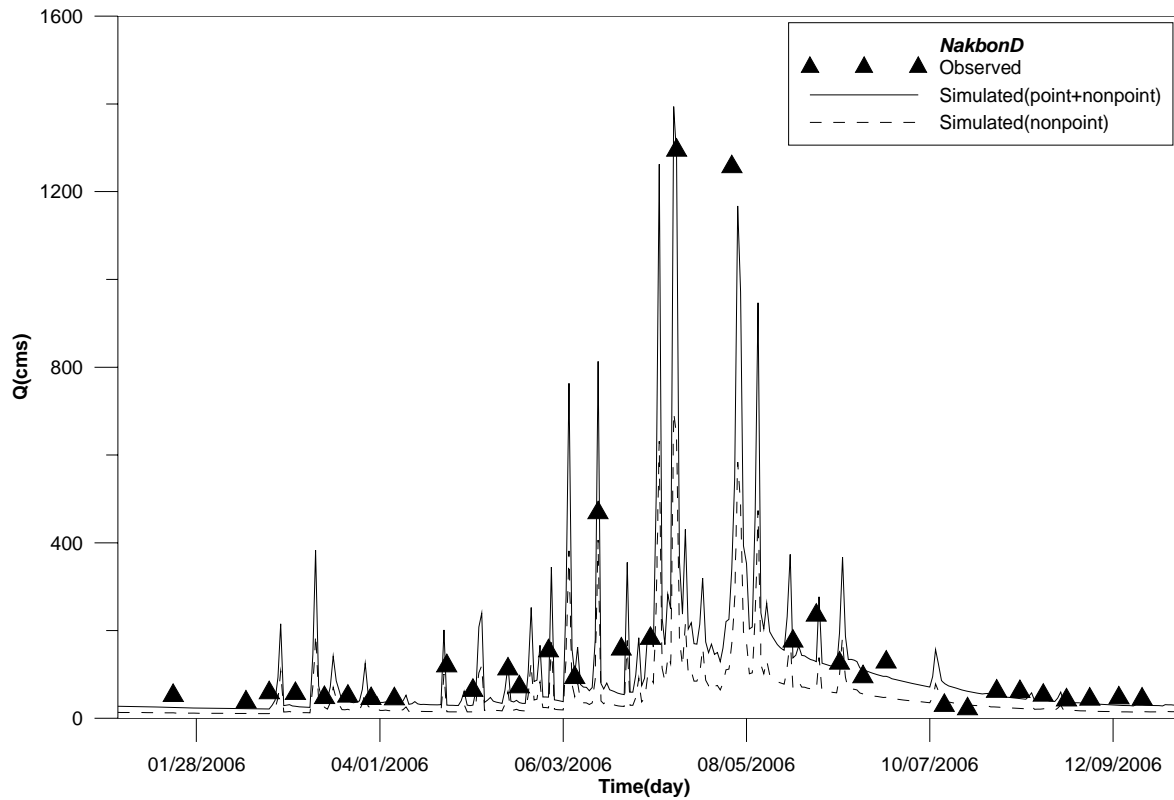


Fig. 6. Runoff Hydrograph due to Non-point Source Pollution

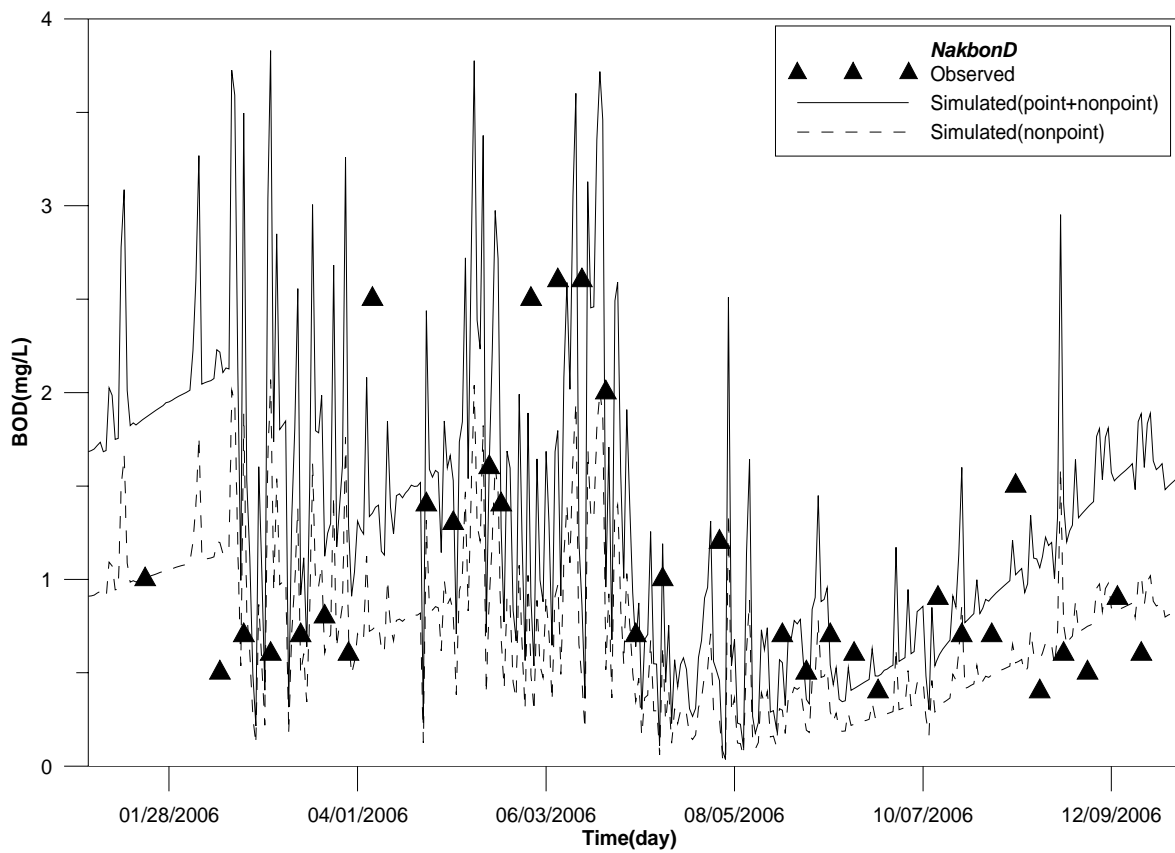


Fig. 7. BOD Pollutograph due to Non-point Source Pollution

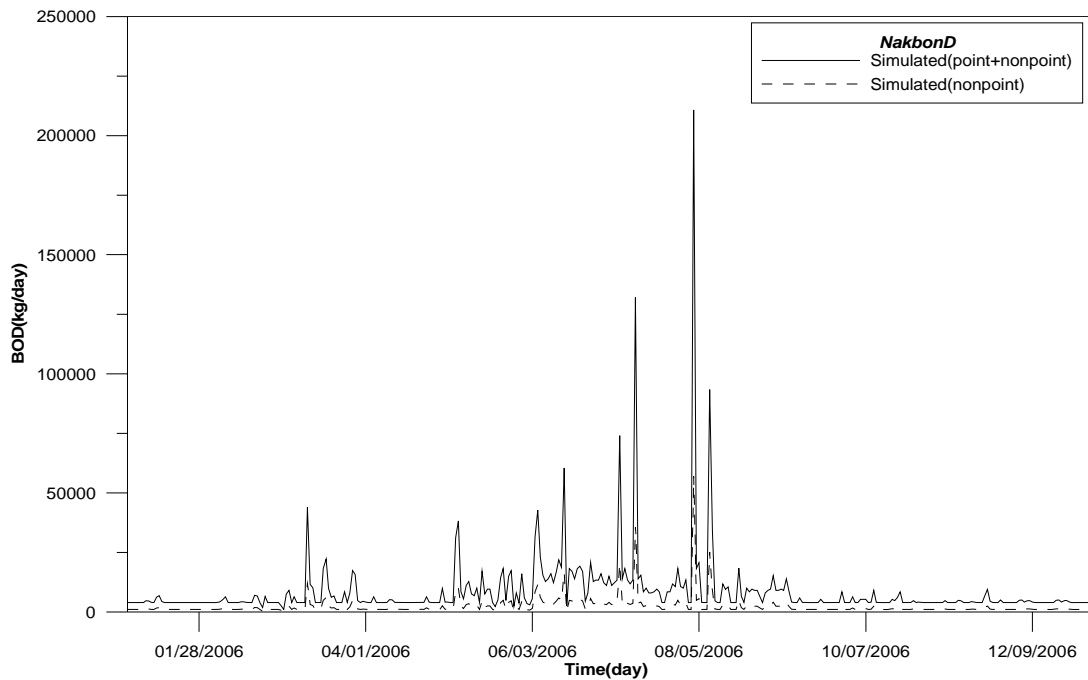


Fig. 8. Load Graph due to Non-point Source Pollution

모의 결과, 점오염원에 의한 부하량은 강우에 상관없이 일평균 값이 유사하게 부하되는데 반해 비점오염원에 의한 부하량은 강우에 의한 유출에 의하므로 변동폭이 심함 유알 수 있다.

그러므로 강수량의 변동에 따른 유출량의 변화의 효과로 비점오염원의 양은 변동될 수 있고 그 양은 27% 정도가 차지하는 것으로 나타났다.

3.2 낙본 E유역의 비점오염원 정량화

3.2.1 유역 모의 자료

낙본 E 단위유역은 낙동강 수계구간 중 상주시와 구미시 경계점후부터 구미시와 칠곡군 경계점전까지 전 구간 및 유역으로써, 낙동강유역의 중류부에 해당된다. 유역의 상류 입력 조건은 낙본 D 단위유역 모의 결과를 입력하였고, 낙본 최종유출구는 낙본 E 말단지점으로 설정하였다.

또한, 감천이 지류로 유입되는 유역으로써, 감천 A단위유역 데이터를 지류조건으로 입력하였다.

낙본 E 단위유역의 점오염원은 구미하수종말처리장과 도개하수종말처리장 2곳이다. 따라서 본 연구에서는 점오염원의 정확한 산정을 위해 SWAT의 입력자료로 이들 자료에 대한 오염원자료를 제시하고 또한 각 소유역으로 구분을 하여 모의를 수행하여 보았다. 또한 상기에서 언급한 바와 같이 2006년 자료를 이용하여 모의를 수행한다.

모의 대상 유역에 대한 입력 조건으로 낙본 D단위유역 유출 유량 및 수질, 감천 A단위유역에 대한 유출 유량 및 수질을 입력하였다.

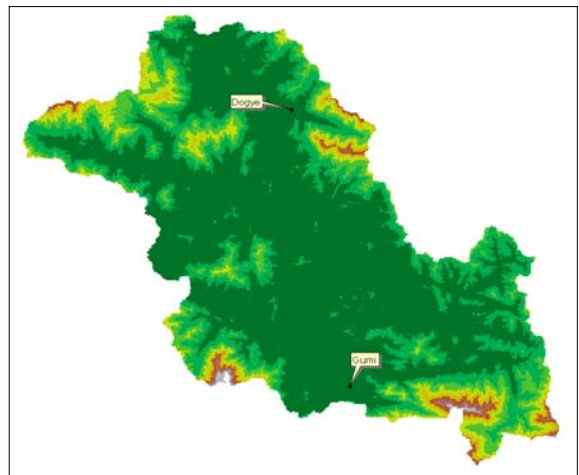


Fig. 9. GIS Map of Nakbon E Watershed

3.2.2 낙본 E 유역에서의 비점오염원 정량화

낙본 D단위유역과 마찬가지로 낙본 E말단지점을 검·보정 지점으로 선정하여 관측 유량 및 수질 자료를 검·보정을 수행하였다. 유량 민감도 분석에서 민감도 순위가 높은 순으로 3가지 매개변수를 선정하여 검·보정을 수행하였다. 또한, 5일 BOD 값에 영향을 주는 매개변수는 탈산소계수 즉 RK1, 침전에 의한 생물학적 산소 요구량 손실 계수 RK3, 토양층에서의 침식에 영향을 미치는 매개변수 K에 영향을 받으므로 세 가지 변수를 중심으로 하여 하천 수질 검·보정을 실시하였다.

유량과 수질을 검·보정한 결과는 다음 그림과 같이 나타나고 있다.

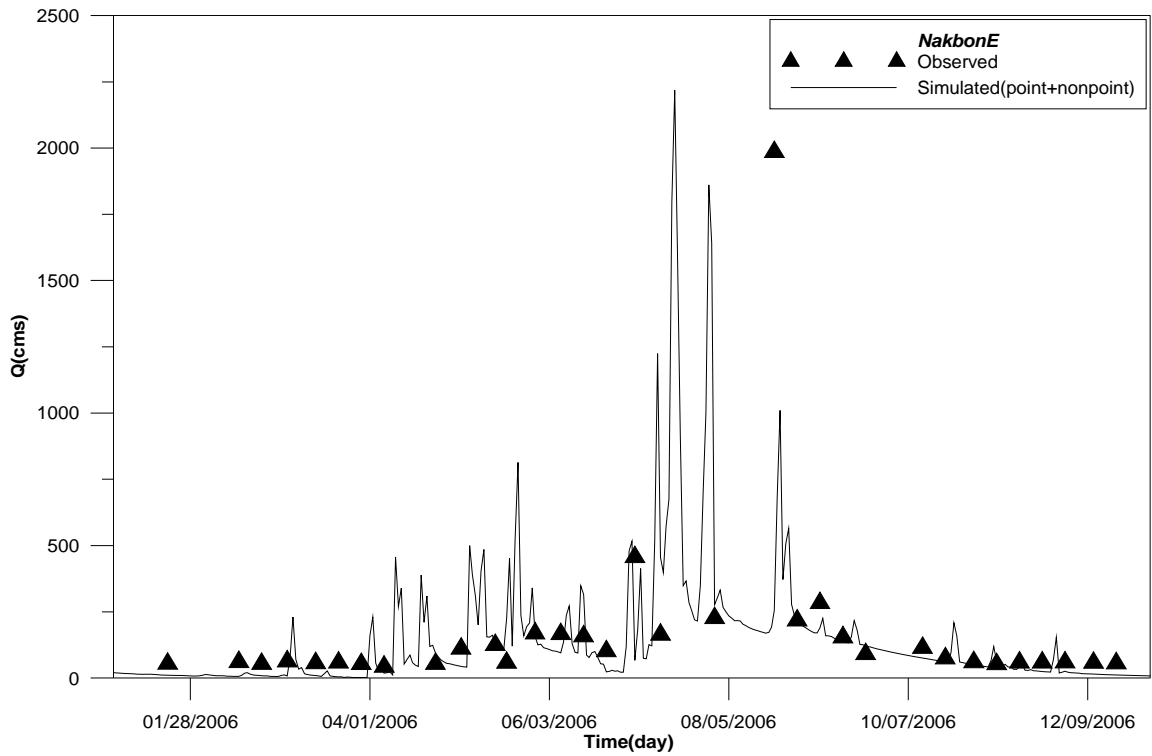


Fig. 10. Runoff Hydrograph

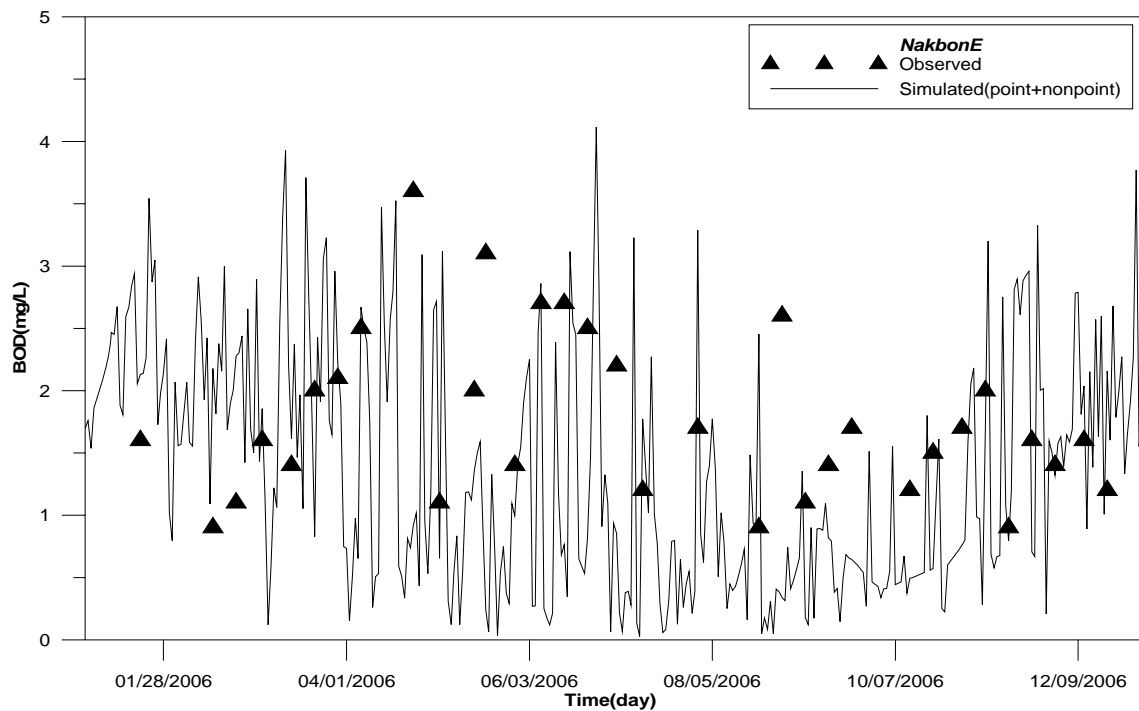


Fig. 11. BOD Concentration

위의 Fig. 10과 Fig. 11은 유역의 최종 유출구지점에서의 유량 및 BOD의 검·보정 결과이다. 검·보정의 경우 점오염원과 비점오염원의 총량으로 검·보정하였으며, 유량의 경우 첨두시간이 잘 일치하지 않고 있으나, 갈수

기와 기타 기간에 유량이 실측치와 일치하는 모습을 보이고 있다. BOD의 경우는 실측치에 비해 다소 낮게 나타나고 있다.

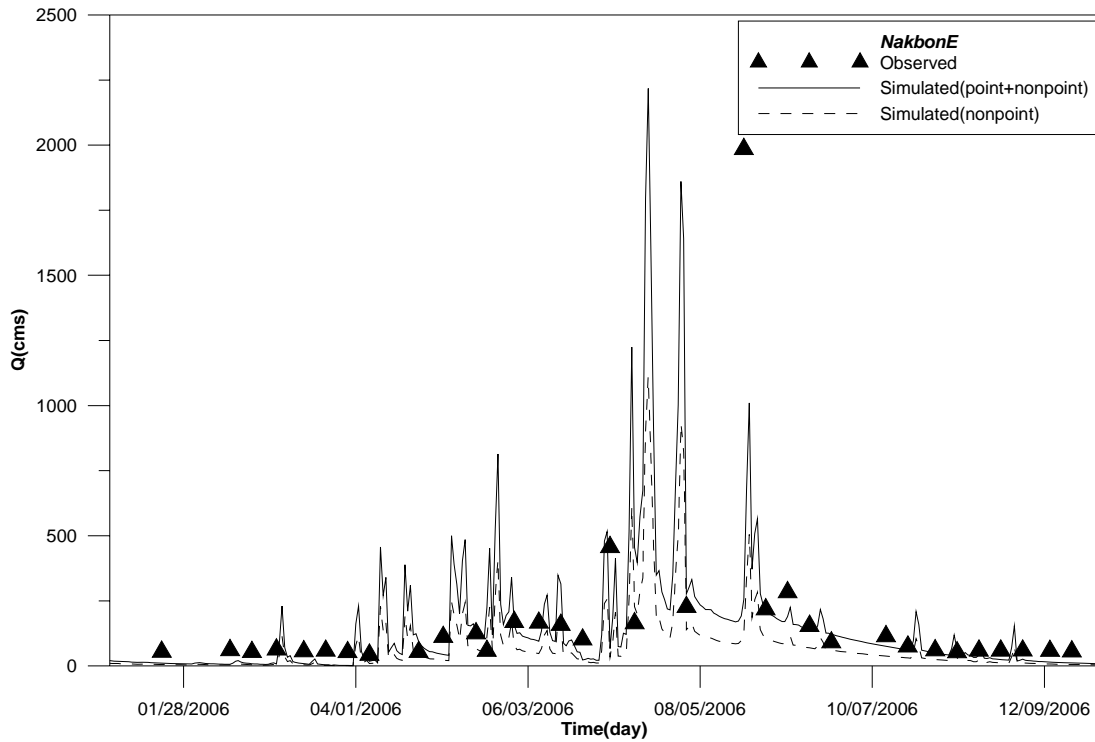


Fig. 12. Runoff Hydrograph due to Non-point Source Pollution

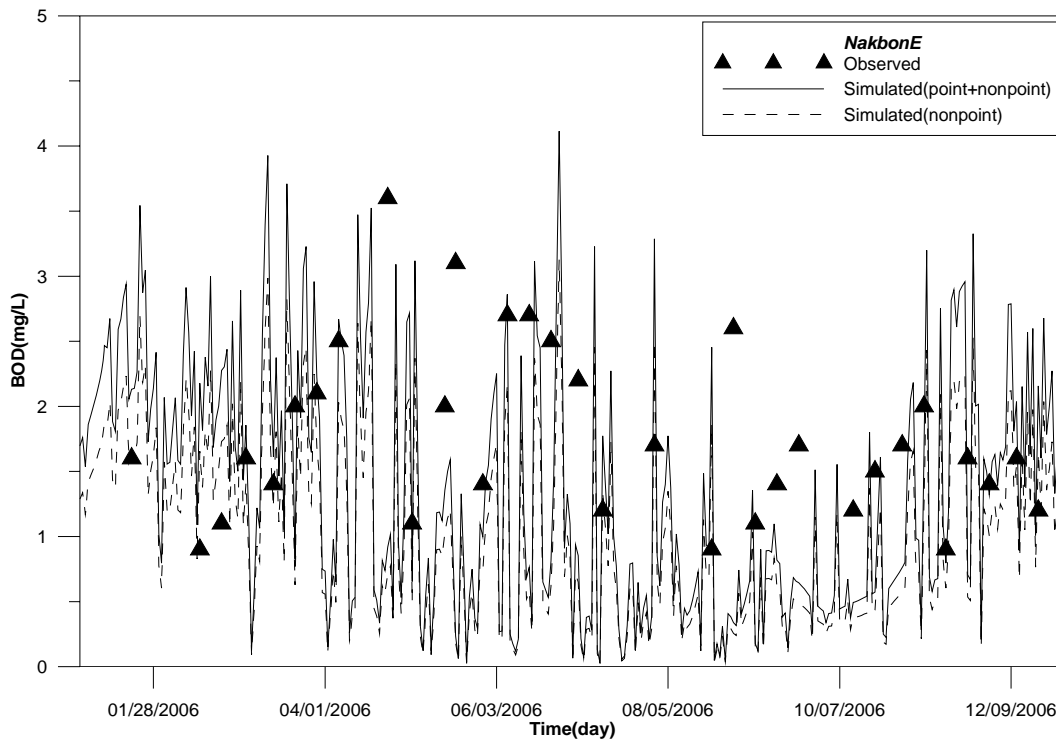


Fig. 13. BOD Pollutograph due to Non-point Source Pollution

점선으로 나타나는 부분이 비점오염원에 의한 유량 및 수질을 나타내며 실선과 점선의 차가 점오염원에 의한 결과를 나타낸다. 현재 매개변수 검·보정을 통한 유량 및 수질 검토가 이루어졌고, BOD에 대한 비점오염원 정량화

가 이루어졌다.

유량의 경우 낙본 D단위유역과 마찬가지로 침투치가 실제보다 조금 높게 나타나는 현상이 나타나고 있으나 전체적인 추세와 비슷한 결과를 도출할 수 있었다.

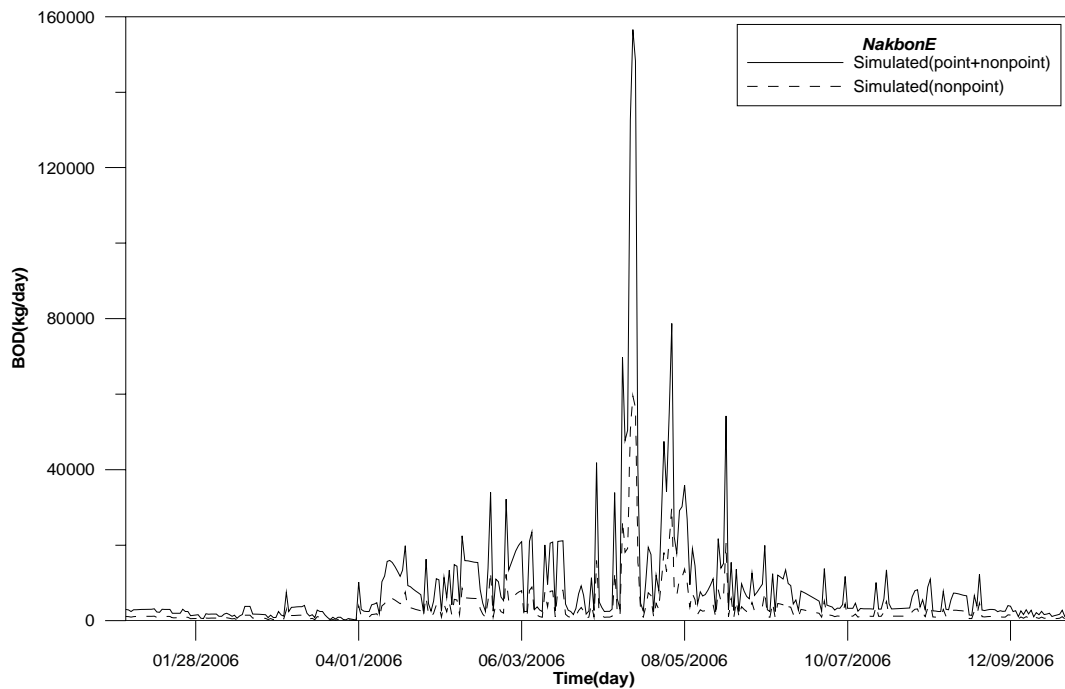


Fig. 14. Load Graph due to Non-point Source Pollution

위의 그림에서 나타난 바와 같이 점오염원의 영향을 입력한 모의 결과와 점오염원의 영향을 제외한 모의결과는 큰 차이가 있는 것으로 나타난다.

전체 오염부하량에서 비점오염원 부하량이 차지하는 비율이 38%정도로 나타나고 있다.

3.3 낙본 H 유역에서의 비점오염원 정량화

3.3.1 유역자료

하천의 수질에 영향을 미치는 첫 번째 요소인 점오염원 자료를 수집하여 분석하였다. 낙본 H유역 내의 하수종말처리장은 의령부림하수종말처리장과 창녕하수종말처리장으로 유역내에 총 2개소의 하수종말처리장이 위치하고 있다. 이중 의령부림하수처리장은 처리용량이 1,000 ton/day이고, 처리방법은 산화구법을 이용하고 있으며, 창녕하수처리장의 경우 처리용량은 6,000 ton/day이고, 처리방법으로는 회전원판법을 이용하고 있다. 이 두 시설 모두 처리용량이 크지 않고, 낙본 H유역의 경우 점오염원으로 판단되는 지점이 두 곳이어서 상류로부터 유입되는 양을 제외하고는 점오염원의 영향이 크지 않을 것으로 예측된다.

하천 수량 및 하천 수질은 환경기초시설에 의한 유입뿐 아니라 강우에 의한 유량 및 비점오염원의 영향으로 나타난다. 이러한 현상을 모의하기 위해 낙본 G 단위유역 말단지점의 유량 및 수질을 경계조건으로 고려하고, 또한 황강 B로부터 유입되는 유량과 수질을 입력하였으며, 환경기초시설의 방류 유량 및 수질을 고려하여 낙본 H 단위

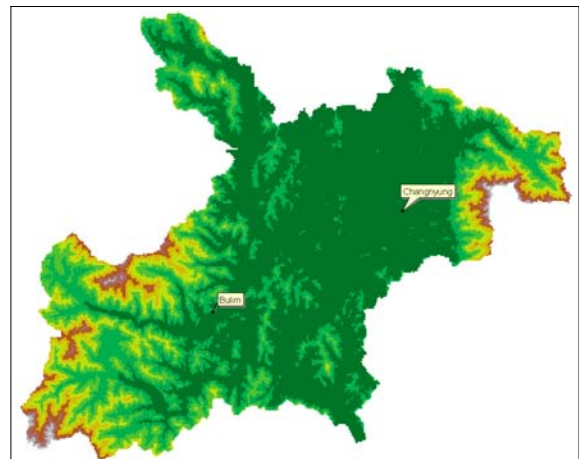


Fig. 15. GIS Map of Nakbon H Watershed

유역 말단지점의 유량 및 수질을 검·보정을 수행하였다.

3.3.2 낙본 H유역에서의 비점오염원 정량화

민감도 분석에 의한 결정된 주요 변수를 선정하여 검·보정을 실시하였다. 또한 환경기초시설의 방류 유량 및 방류 수질 자료의 빈도는 1일 1회에 해당하고, 단위유역 말단지점의 하천수질은 8일 간격 자료이므로 자료 구간의 일치를 위하여 단위유역 말단지점의 하천수질을 3차 Hermite 내삽법을 통하여 내삽을 실시하였다.

낙본 G 유역의 말단지점을 상류단 경계로 입력하고, 또한 황강 B의 유입유량과 수질을 입력자료로 고려하였다.

또한 환경기초시설의 일별 방류 유량 및 수질을 유입조

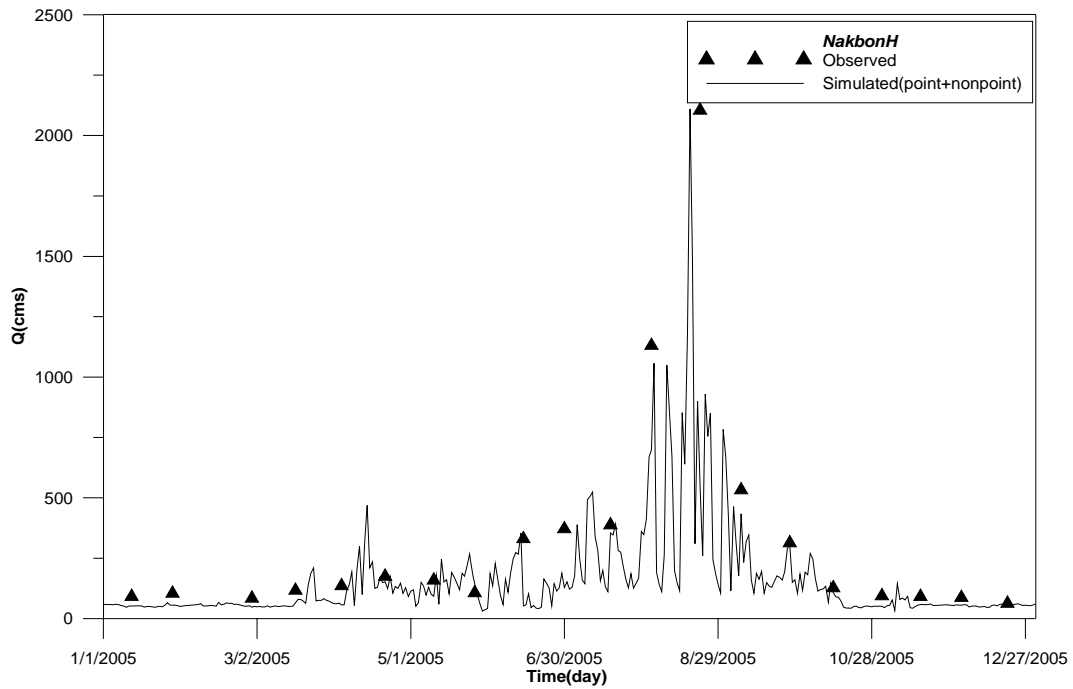


Fig. 16. Runoff Hydrograph

건으로 추가하여 모의를 수행하였다.

또한 낙본 H유역의 말단지점을 검·보정 지점으로 선정하여 관측 유량 및 수질 자료를 검·보정을 수행하였다. 유량 민감도 분석에서 민감도 순위가 높은 순으로 3가지 매개변수를 선정하여 검·보정을 수행하였다. 구체적으로 CN2, surlag, SOL_AWC 매개변수에 대하여 유출수문곡선과 검·보정을 실시하였으며 유량 검·보정 결과는 그림과 같다.

SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 모형의 자동 검·보정 기능은 유량 및 질소 순환에 관련된 제반 오염도, 인 순환에 관련된 제반 오염도를 위주로 개발되었다. 그러나 5일 BOD 값에 영향을 미치는 매개변수는 SWAT 모형의 자동 검·보정에 포함되지 않아 해석이 용이하지 않다. 그러므로 본 연구에서는 시행착오 기법을 통하여 하천 수질을 보정하였다.

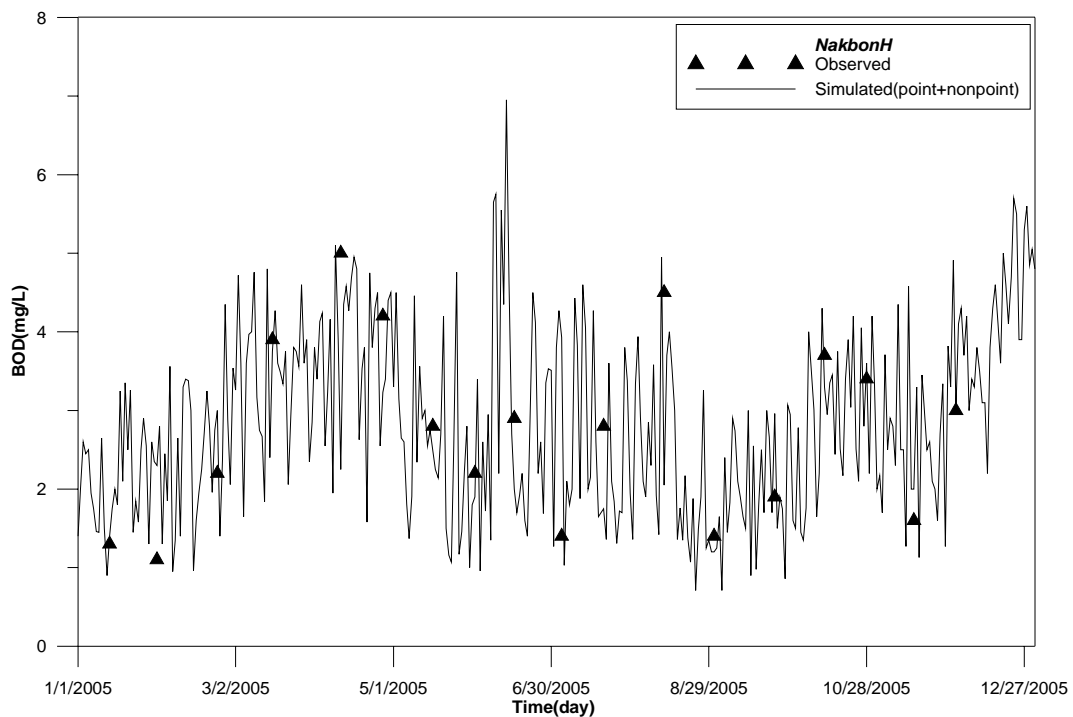


Fig. 17. BOD Concentration

점오염원 자료를 모두 제거한 결과는 다음과 같다. 점선으로 나타나는 부분이 비점오염원에 의한 유량 및 수질을

을 나타내며 실선과 점선의 차가 점오염원에 의한 유량 및 수질을 나타낸다.

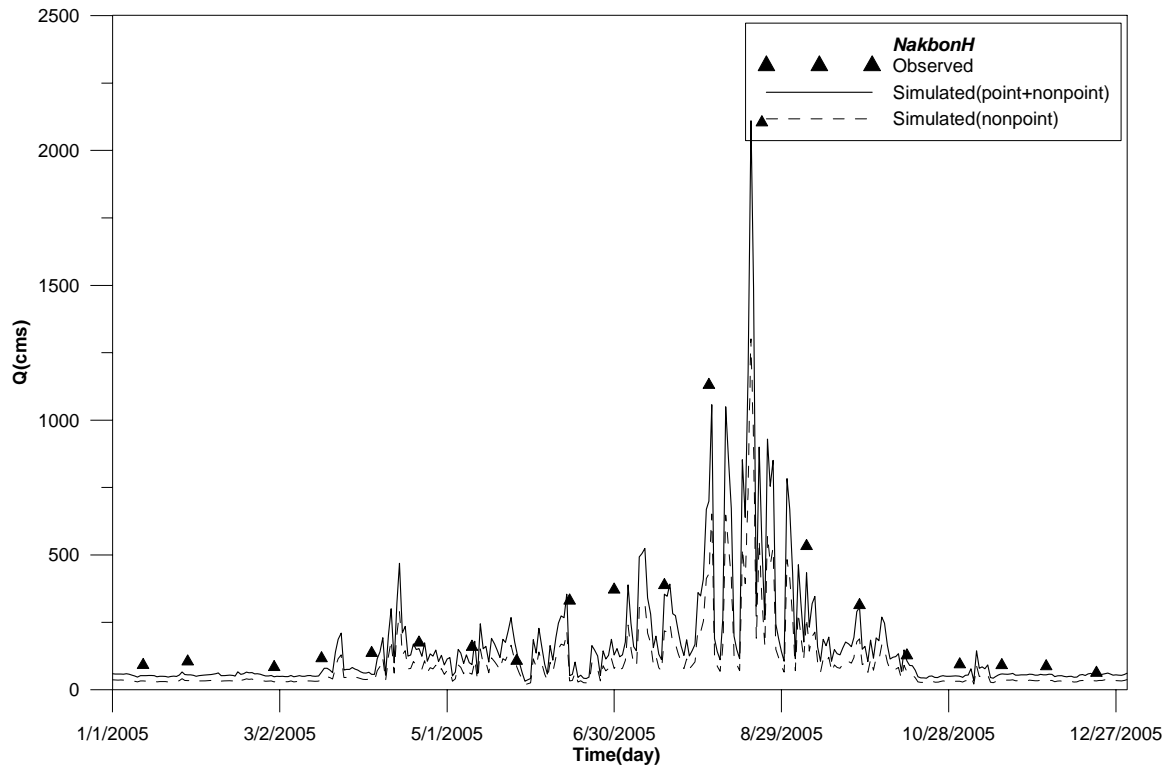


Fig. 18. Runoff Hydrograph due to Non-point Source Pollution

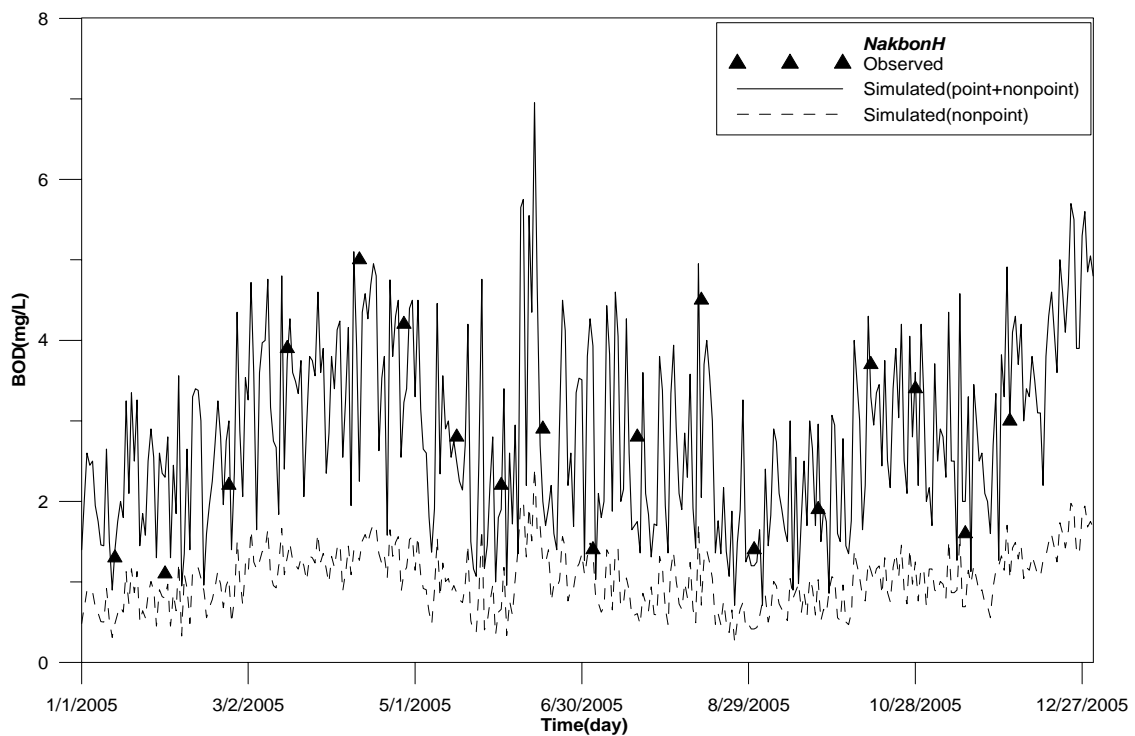


Fig. 19. BOD Pollutograph due to Non-point Source Pollution

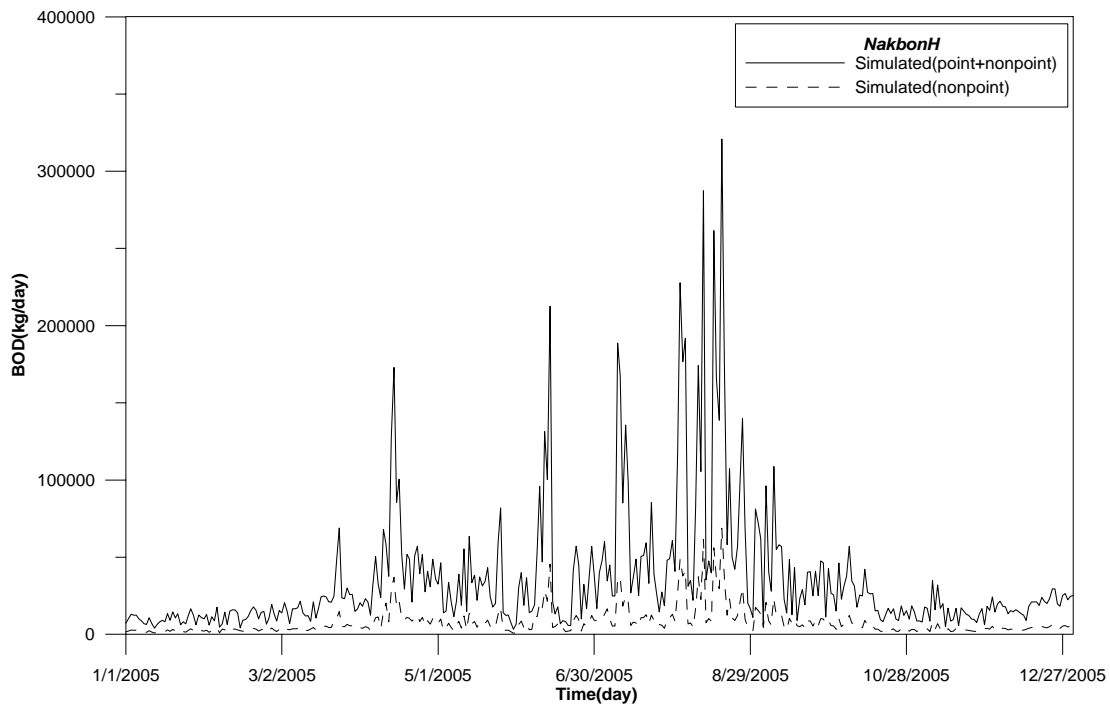


Fig. 20. Load Graph due to Non-point Source Pollution

이와 같은 결과를 바탕으로 하여 하천수질에서의 일별 평균 점 및 비점오염원에 의한 부하량을 산정하였다.

낙본 H유역의 경우 상류단의 낙본 G와 측방에서 황강 B가 유입되는 유역으로 유역자체의 점오염원 배출시설의 수는 적으나 낙본 G와 황강 B로부터 유입되는 수질의 영향으로 인해 비점오염원의 영향이 전체 오염부하의 39% 정도를 차지하고 있다.

3.4 모형의 정확도 분석

2006년 자료의 검·보정 결과해석을 위하여 Nash-Sutcliffe 계수를 적용하여 모형의 예측 정도를 파악하였다. 이 계수는 Eq. (5)에서와 같이 관측치와 모의치 간의 관계에 대하여 양적으로 표현하는 값으로 -∞에서 1의 범위 내에 존재하며, 1은 관측치와 모의치가 완벽하게 일치한다는 것을 의미한다.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (5)$$

여기서 Q_o 는 관측 유량, Q_m 은 모의 유량, Q^t 는 시간 t 일 때의 유량을 나타낸다 (Nash and Sutcliffe, 1970). 최근에 Nash-Sutcliffe 계수는 유량 및 수질의 모의 수준을 평가하는 데 이용되어 오고 있다. (Moriasi et al., 2007) 유량 관측의 예측도를 표현하는 계수가 0.75 이상일 때는 모의가 비교적 정확하게 수행되어졌다고 하고 0.75와 0.36 사이의 값일 때 모의 결과는 보완하여야 하는 것으로 언급된다. (Motovilov et al., 1999)

본 연구에 적용된 유량 및 부하에 대한 Nash-Sutcliffe 계수는 낙본 D의 경우 0.82, 0.61이며, 낙본 E의 경우 0.76, 0.57, 낙본 H의 경우 0.85, 0.69로 나타났다. 부하의 경우 유량 및 수질의 불확실성을 모두 반영하여 나타나게 되므로 유량에 비해 비교적 낮은 값으로 확인되었다.

이러한 해석 결과를 바탕으로 하여 점 및 비점오염원에 의한 일평균 부하량을 산정하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 대상유역의 비점오염원 비율은 전체의 27%에서 39%정도로 나타나고 있다. 낙본 E 유역과 낙본 H 유역에서는 40%에 가까운 비율을 나타

Table 1. Point and Non-point Source Daily Load in Nakbon Watershed

Watershed	Point Source Daily Load (kg/day)	Non-point Source Daily Load (kg/day)	Total Daily Load (kg/day)
Nakbon D	6291.0 (73.0%)	2326.8 (27.0%)	8617.8 (100.0%)
Nakbon E	5500.7 (62.0%)	3371.4 (38.0%)	8872.1 (100.0%)
Nakbon H	21506.3 (61.0%)	13767.1 (39.0%)	35273.4 (100.0%)

내고 있는데 반에 낙본 D 구역의 경우는 27%정도로 다른 두 구역에 비해 비교적 낮은 비점오염원 비율을 나타내고 있는데, 이는 낙본 E 구역과 낙본 H 구역의 경우 구역의 경계지점에서 하천까지의 거리가 짧은데 반해 낙본 D 구역의 경우는 본류 하천으로부터 하천 경계지점까지의 거리가 상대적으로 멀리 떨어져있어 강우로 인해 발생된 비점오염원이 지표층을 유하하는 과정에서 감소가 발생하여 하천의 비점오염원 비율이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 구역의 비점오염원 비율은 국립환경과학원에서 조사된 비점오염원 비율인 22~37%정도와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

4. 결 론

낙동강유역에서의 비점오염원의 정량화는 삭감시설의 삭감량 평가 및 배출오염원 평가에 더욱 절실한 문제로 부각되고 있다. 삭감시설의 삭감량 평가 시에는 실험실 규모로 이상적인 유량 상태를 가정하여 삭감효율을 산정하고 있으나 자연강우에 의하여 나타나는 삭감효율 평가는 이상적인 유량 평가 해석시와 사뭇 다른 경향을 나타낸다. 또한 유역 말단 지점에서의 3년 평균 수질이 목표수질을 상회하였을 경우 오염총량 기본계획 지역에서 오염총량 이행평가 지역으로 포함시켜 오염부하량 관리를 실시하고 있다. 그러나 배출부하량과 수질의 연계가 쉽지 않고, 그 원인이 되는 지역 및 시기를 찾아 특별 관리하는 것이 난해하여 하천 수질 관리가 어려운 실정이다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 낙동강 유역에서의 비점오염원 정량화에 관한 방법론을 제시하였고 각 단위 유역별 비점오염원 부하량을 정량화시켜 분석하였다.

- 1) 유역 모형인 SWAT을 통하여 하천수질에서의 점 및 비점오염원 부하량 비율을 구분하였다. 이는 오염총량제의 궁극적인 목적이 하천수질의 개선에 있으므로 하천에 영향을 미치는 원인 물질의 규명은 상당히 중요하다. 비점오염원에 의한 부하량을 정량화함으로써 각 구역의 비점오염원 관리 자료로 활용될 수 있으므로 본 연구에서 비점오염원에 의한 부하량 분리를 수행하였다.
- 2) 유역 모형을 통한 비점오염원 정량화 결과, 점오염원에 의한 부하량은 강우량과 상관없이 부하되는 것으로 나타났고, 비점오염원에 의한 부하량은 강우에 따른 유출현상 때문에 변동이 심한 것으로 확인되었다. 또한 하천수질에 영향을 미치는 비점오염원의 비율이 27~40% 정도인 것으로 확인되었다. 이는 비점오염원이 BOD 기준으로 4대강 오염부하의 22~37% 이상 차지한다는 국립환경과학원의 조사

결과와도 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

- 3) 본 연구의 대상유역 중 낙본 D 구역의 경우는 27% 정도로 다른 두 구역에 비해 비교적 낮은 비점오염원 비율을 나타내고 있는데, 이는 본류하천과 유역 경계지점 간의 거리차로 인해 나타나고 있는 것으로 판단된다. 낙본 D 구역의 경우 하천이격거리가 다른 두 구역에 비해 크게 나타나고 있어 강우로 인해 발생된 비점오염원이 지표층을 유하하는 과정에서 감소가 발생하여 하천의 비점오염원 비율이 감소한 것으로 판단된다.
- 4) 비점오염원의 정량화를 위한 유역 모형의 적용은 하천의 동적인 변동을 확인할 수 있고 또한 문제가 되는 오염원의 원인 및 기간 등의 자료를 획득할 수 있다. 관측자료 및 유역모형에 필요한 자료의 구축이 아직 미흡한 상황이라 SWAT 모형 적용 또한 제한되어 있다. 그러므로 기반 자료의 확보 및 SWAT 모형의 다양한 접근을 통하여 해석에 노력을 기울이고, 또한 우리 지형에 맞는 하천 수질 지배 방정식으로서의 수정이 이루어진다면 유역관리에 좋은 해법을 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 낙동강 수계 관리위원회 환경기초 조사 사업의 「주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 감기법 연구」에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2006). **한국수문조사연보**.
- 낙동강물환경연구소 (2006). (오염총량관리를 위한 '06) 낙동강수계 유량측정사업 운영결과.
- 환경부 (2006). **물환경관리기본계획**.
- Brown, L.C., Barnwell, Jr. T.O. (1987). *The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual*. EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, GA.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models." *Journal of Hydrology, ASCE*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Menzel, R.G. (1980). *Enrichment ratios for water quality modeling*. In: *CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. Conservation Research Report 26, Department of Agriculture, Washington, D.C., pp. 482-492.

Moriasi, D.N., et. al. (2007). "Model Evaluation Guidelines Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations." *Transactions of ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.

Motovilov, Y.G., L. Gottschalk, K. Engeland and A. Rohde. (1999). "Validation of a distributed hydrological model against spatial observations." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 98, pp. 257-277.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forec-

asting through conceptual model part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Thomann, R.V., and Mueller, J.A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. Harper & Row Publishers, New York, pp. 644.

논문번호: 10-004	접수: 2010.01.12
수정일자: 2010.02.11/03.05	심사완료: 2010.03.05