

Research Paper

유역모형을 이용한 도시지역의 불투수면 변화에 따른 오염물질 유출 해석

공석호 · 김태근
청주대학교 환경공학과

Analysis of Pollutants Discharge due to the Change of Impervious Land in Urban Area Using Watershed Model

Gong, Seok Ho · Kim, Tae Geun

Department of Environmental Engineering, Cheongju University

요약 : 본 연구는 무심천 유역을 대상으로 도시화에 따른 불투수 지역의 증가가 오염물질의 유출에 미치는 영향에 대하여 HSPF 모델을 이용하여 평가하였다. 모델의 보정은 2015년도 관측치, 검증은 2014년도 관측치를 기준으로 하였고, 모의항목은 유량, BOD, TP를 대상으로 하였으며, 모형의 보정 및 검증 결과는 모든 모의항목이 성공적으로 수행되었다. 무심천 유역의 2015년도 토지이용 현황을 반영하여 모형에 사용한 토지피복도를 수정한 후 개발지역의 계획 위치와 면적을 적용하여 수질을 모의하였다. 모의 결과 불투수면이 증가하면 일별 오염부하량은 강우 시에는 개발사업 전보다 증가하고, 비강우 시에는 감소하였다. 연간 오염부하량은 강우 시 증가량이 비강우 시 감소량보다 월등히 많아 BOD와 TP의 부하량은 증가하였다. 또한 비점오염부하량은 개발 전의 점오염원이 동일하고, 불투수면만 증가한다는 전제에서 모의한 결과 개발 후의 비점오염부하량이 개발 전의 총오염부하량보다 크게 산정되어 불투수면이 급증하는 유역은 계획 단계에서부터 비점오염원의 관리대책이 필요한 것으로 나타났다.

주요어 : HSPF 모형, 불투수면, 토지피복도, 비점오염

Abstract : The purpose of this study is the evaluation of the impact of increase in impervious areas due to urbanization on the pollutant discharge using the HSPF model at Musim watershed. Model calibration and validation were performed based on the observed data 2015 and 2014, all simulation items have been successfully simulated such as flow, BOD, and TP. The land cover map used in the model reflected on the land use status of the Musim watershed in 2015 and the application of the development areas and locations. As a result of simulation, during rainfall daily pollutant load with the increased impervious land increased more than that before the development. However, the

First Author: Seok Ho Gong, Dept. of Environmental Engineering, Graduate School, Cheongju University, Chungbuk 28503, Korea, Tel: +82-43-229-8575, E-mail: suckhoya@naver.com

Corresponding Author: Tae Geun Kim, Dept. of Environmental Engineering, Cheongju University, Chungbuk 28503, Korea, Tel: +82-43-229-8575, E-mail: ktkenv@cju.ac.kr

Received: 13 December, 2017. Revised: 12 January, 2018. Accepted: 15 January, 2018.

pollutant load decreased during the non-rainfall time. Annual pollutant load in rainfall time was significantly higher than that in non-rainfall time, BOD and TP increased. The simulation of non-point source pollutant load was applied under two assumptions, such as the increased area of impervious land and the non-change number of point source load before and after development. As the result of a simulation, the non-point source pollutant load after development was bigger than those before development. It was necessary to take measures to control non-point source pollution at the consideration status of development.

Keywords : HSPF model, Impervious land, Land cover map, Non-point source pollution

I. 서론

인구의 도시 집중으로 야기되는 도시화 과정에서는 임야, 농지 등의 투수면이 감소하고 건물과 도로 등의 불투수면이 증가하는 경향이 있다. 불투수면은 일반적으로 도시의 인공구조물에 의해 물이 잘 침투하지 않는 공간 면(Schueler, 1994), 또는 강수 등의 물이 토양 속으로 침투할 수 없는 포장 지역으로 정의할 수 있다(Arnold & Gibbons, 1996). 불투수면은 총불투수면과 유효불투수면으로 구별하여 정의하기도 한다. 총불투수면은 특정 불투수면이 수계에 직접적인 영향을 주는지 여부와 관계없이 해당 노면의 침투특성만을 고려한 불투수면을 의미하고, 유효불투수면은 불투수면 중 유출수가 곧바로 배수체계로 연결되어 수계에 직접적인 영향을 미치는 불투수면을 의미한다. 일반적으로 도시구역의 유효불투수면은 총불투수면보다 작은 면적을 차지하지만 고도로 발달된 도시일수록 총불투수면에 근사한 값을 갖는 경향이 있다(National Institute of Environmental Research, 2014).

유역 내 불투수면이 증가하게 되면 강수의 토양 침투를 억제함으로써 토양에 의한 자연적인 오염물질 저감과정을 차단하고, 지표유출량이 많아지며, 지표면에 쌓여 있던 오염물질을 인근 수계로 유출시킴으로써 수질오염에 큰 영향을 준다. Jang 등(2005)은 한강수계인 안양천, 경안천, 북하천에서 11개 수질조사 지점의 자료를 수집하여 유역내 인자의 양적 변화와 수질 농도 상승 사이의 연관성을 분석한 결과 경안천과 안양천 유역의 경우 불투수면 증가에 따른 수질농도 상승 영향이 뚜렷하게 나타났다고 하였고, 다

수의 연구자들(Lee 2010; Choi et al. 2008; Park et al. 2008)도 유역 내 불투수면의 증가는 해당 수계의 수질오염에 많은 영향을 끼친다고 보고하였다. 불투수면 변화가 수질오염에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 지속적인 유량-수질의 관측이 요구되지만, 오염물질의 유출 특성을 정량적으로 파악하기 위해서는 관측자료만으로는 불충분하기 때문에 지속적이고 연속적으로 유량과 수질을 모의할 수 있는 유역모형을 이용하고 있다.

본 연구에서는 충북 청주시를 관류하고 있는 무심천을 대상으로 HSPF(Hydrologic Simulation Program-Fortran) 모형을 이용하여 유역 내 대규모 택지개발사업이 진행되고 있는 지역의 불투수면이 증가할 경우 비점오염물질의 부하량 변화를 분석하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상 지역

본 연구는 청주시를 관류하는 무심천을 대상으로 하였다. 무심천의 유역면적은 198.8 km²이고, 유로연장은 32.4 km인 지방하천으로서 청주시 상당구가 덕면에서 발원하여 미호천 중류로 유입된다. 무심천 수계는 월운천, 미평천, 울량천 등의 주요 지류가 있으며, 인접해 있는 대청호에서 관개용수와 환경용수를 공급받고 있다.

무심천 유역의 행정구역은 청주시와 청원군으로 분리되어 있었으나 2014년에 청주시로 통합되었으며, 유역 내 인구는 2015년 현재 약 493,000명으로 청주

시 전체인구의 약 55%가 거주하고 있다. 토지이용 형태는 상류부터 중류까지는 대부분 임야와 농경지이고, 중-하류는 도시지역으로 구성되어 있다.

무심천 유역은 수질오염총량관리제에서 전체 유역이 무심A 단위유역으로 지정되어 있는데 지속적인 인구 유입으로 개발 수요가 폭증하여 할당부하량과 목표수질 준수에 어려움을 겪고 있다.

2. HSPF 모형의 구축

본 연구에 적용한 HSPF 모형은 BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources)를 이용하여 구축하였다. HSPF 모형은 모형 사용자가 불투수면적률을 정의할 수 있고, 유출은 투수면과 불투수면으로 구분하여 모의하도록 되어 있다.

모형은 먼저 30 m×30 m의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)로부터 「Flow Direction」과 「Flow Accumulation」을 계산하여 하천망을 생성시킨 후 유역의 출구지점을 「outlet」으로 지정하여 구축하였다. 토지 이용정보는 환경부에서 2007년에 제작한 중분류 토지피복도를 기반으로 2015년도의 지목별 토지이용현황 자료를 이용하여 무심천 전체 유역의 토지피복도를 수정한 후 모형 내의 Landuse and Soil Definition Utility를 이용하여 추출하였다. 환경부의

중분류 토지피복도는 토지이용 형태에 따라 22개 항목으로 구분되어 있는데 본 연구에서는 HSPF 모형에 입력하기 위해 22개 항목을 시가화·건조지역(Urban or Built-up land), 농업지역(Agricultural land), 산림지역(Forest land), 초지(Pasture land), 습지(Wetland), 나지(Barren land), 수역(Water) 등 총 7개 항목으로 재분류하였다.

또한 기상자료는 강수량, 기온, 이슬점온도, 운량, 일사량, 풍속, 증발산량 등 7개 항목의 시간단위 관측값을 입력한 후 「WDMUtil」 내의 「Disaggregate Functions」 중 「Evapotranspiration」을 활용하여 증발산량을 생성하였다.

점오염부하량 자료는 2015년 오염원 자료로부터 산정한 배출부하량을 입력하였다. 배출부하량 자료 중 생활계, 산업계, 매립계, 양식계는 최종배출부하량을 입력하였고, 축산계는 비점오염원으로 구분되는 부하량은 제외하고 점오염원 부하량만을 사용하였으며, 토지계는 비점오염원이기 때문에 입력에서 제외하였다.

3. HSPF 모형의 보정 및 검증

HSPF 모형을 보정 및 검증하기 위해서는 유량과 수질의 관측자료가 필요하다. 유량은 무심천 하류에 위치한 청주수위관측소의 2014~2015년도 일유량

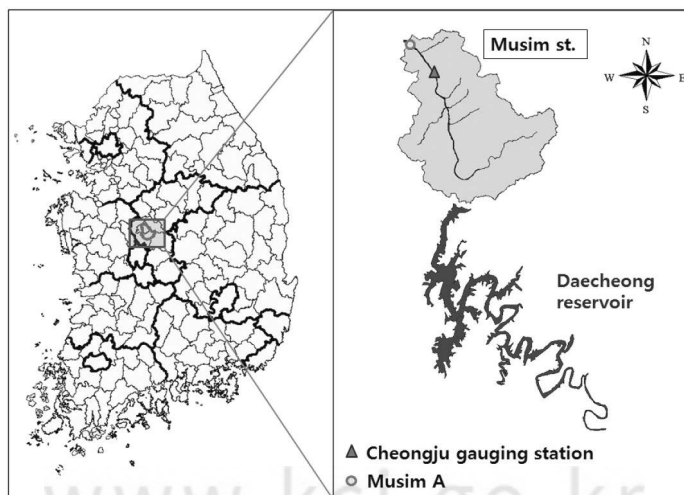


Figure 1. Location map of the study area.

Table 1. General calibration and validation targets or tolerances for HSPF application

		Very good	Good	Fair	Poor
Water flow	R ²	> 0.8	0.7 ~ 0.8	0.7 ~ 0.6	< 0.6
Water Quality / Nutrients	% difference	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35	-

자료를 이용하였고, 수질은 금강물환경연구소가 2014~2015년도에 수질오염총량 단위유역 말단인 무심A 지점에서 연간 40회 정도 측정된 BOD와 TP의 실측자료를 사용하였으며, 청주수위관측소와 무심A의 위치는 Figure 1에 표기하였다.

유량과 수질의 보정은 2015년, 검증은 2014년 자료를 이용하여 수행하였고, 모의 결과에 대한 적정성은 Donigan(2000)이 제안한 Table 1의 기준에 따라 유량은 결정계수(R²), 수질은 % difference 신뢰구간으로 평가하였다.

4. 시나리오 작성 및 적용

본 연구에서는 무심천 유역에서 2015년 현재 대규모 택지 개발사업이 진행되고 있는 월운천과 올량천 유역에 개발사업을 적용하는 시나리오를 작성하여 해당 유역의 불투수면 증가에 따른 BOD와 TP의 유출특성을 평가하기 위해 총오염부하량과 비점오염부하량의 변화를 모의하였다. 비점오염부하량은 보정

과 검증이 완료된 HSPF 모형에서 오폐수량과 점오염부하량 값을 “0”으로 입력한 후 모형을 재구동하여 산정하였다.

III. 연구 결과

1. 모형의 보정 및 검증결과

1) 유량의 보정 및 검증

무심천 유역 내 청주수위관측소의 2015년 유량자료를 이용하여 보정을 실시한 후 2014년 자료로 검증하였다(Figure 2~Figure 3). 보정 결과 유량의 결정계수(R²)는 0.93로 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났고, 검증 시 결정계수는 0.73으로서 보정 결과보다는 낮게 산정되었으나 유량에 대한 모형의 모의치가 유역의 강우사상을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

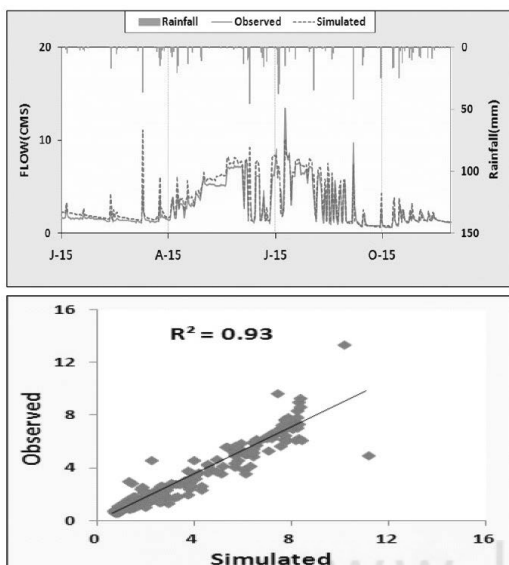


Figure 2. Calibration result of flow rate in Musim stream

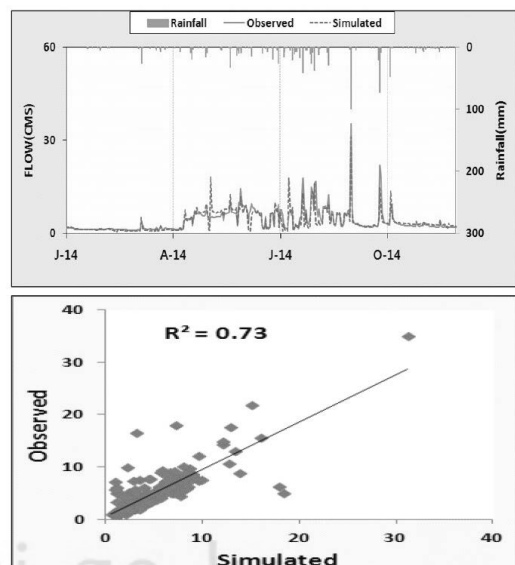


Figure 3. Validation result of flow rate in Musim stream

2) 수질 보정 및 검증

본 연구에서 수질의 보정과 검증은 오염총량관리 단위유역인 무심A 말단에서 연간 40회 정도 측정된 수질자료를 이용하였으며, 수질항목은 현행 수질오염총량관리제의 대상물질인 BOD와 TP로 하였다. 대상 시기는 유량과 같이 2015년에 보정한 후 2014년 자료로 검증을 실시하였으며, 그 결과를 Figure 4~ Figure 5에 도시하였다.

수질 보정 및 검증 시 실측값에 대한 모의 결과의 적정성을 평가하기 위해 Table 1에 제시한 % difference 신뢰구간을 적용하였다. 그림을 보면 BOD의 % difference에 의한 보정 결과는 “Good”이었고, 검증 결과는 “Very Good”이었으며, TP의 보정 결과는 “Very Good”, 검증 결과는 “Good”으로 평가되어 전반적으로 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

2. 시나리오 적용 결과

1) 택지개발사업 반영

2015년 현재 무심천 유역 내에서 대규모 택지개발이 이루어지는 지역은 무심천의 지류인 월운천과 울

량천 유역으로서 Figure 6과 같고, Figure 7은 HSPF 모형 구축 시 사용한 월운천과 울량천 유역의 토지피복도이다.

본 연구에 사용한 토지피복도는 7개 그룹으로 구분되는데 시가화·건조지역에 해당하는 토지이용 형태는 주거지역, 공업지역, 상업지역, 문화·체육·휴양지역, 교통지역, 공공시설지역 등으로 이들 지역은

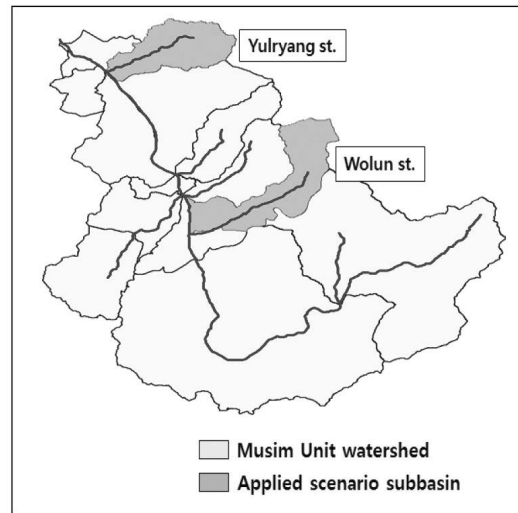


Figure 6. Applied scenario sub-basins.

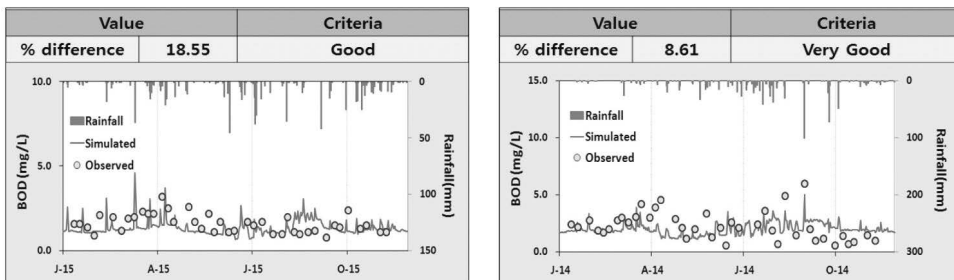


Figure 4. Calibration and validation results of BOD at the site of Musim A.

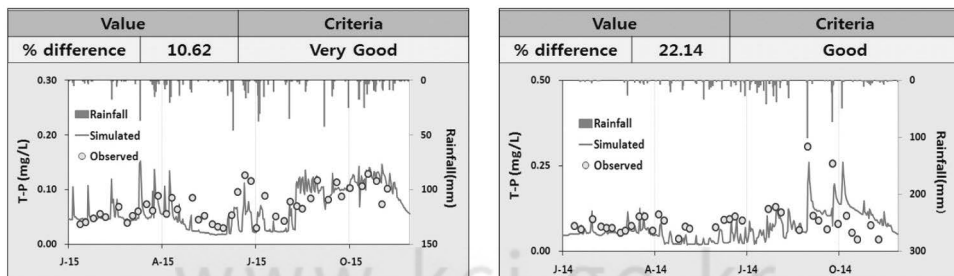


Figure 5. Calibration and validation results of TP at the site of Musim A.

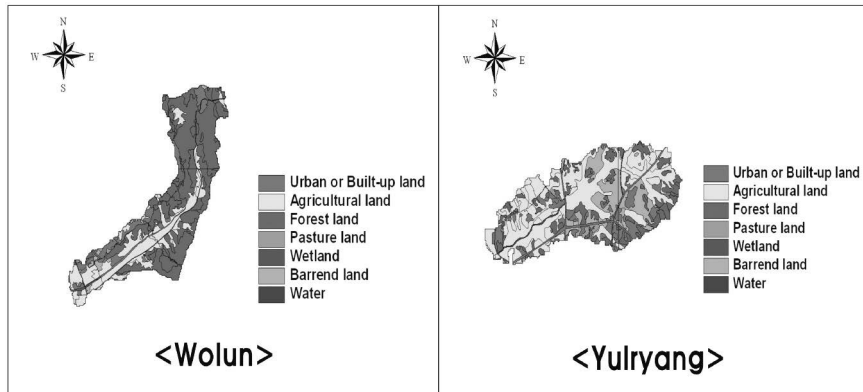


Figure 7. Land cover map of Wolun and Yulryang sub-basin.

HSPF 모형에서 대부분 불투수면으로 분류된다.

월운천과 울량천의 유역면적은 각각 11.1 km²와 6.6 km²이고, 택지개발 면적은 각각 2.07 km²와 1.64 km²로서 각 하천 유역에 택지개발을 반영하였을 때 불투수면의 점유율 변화를 보면 월운천은 6.0%에서 24.7%로 증가하고, 울량천은 8.5%에서 28.3%로 증가하였다. National Institute of Environmental Research(2014)는 건전한 수생태 보전을 위해서는 유역 전체의 불투수면을 최소한 8~10% 이내로 하고, 개발집중지역은 25% 이내로 유지하도록 권장하고 있는데, 월운천과 울량천의 불투수면 비율은 개발집중지역의 한계치에 근접 및 상회하고 있다.

2) 총오염부하량의 변화

월운천과 울량천 유역에 택지개발사업을 반영하여 불투수면 비율의 변경에 따른 BOD와 TP의 오염부하량 변화를 모의하였다. 개발사업 전후의 오염부하량을 정확하게 산정하기 위해서는 해당 소유역 말단에서 유량과 수질의 보정 및 검증이 이루어져야 하지만 전술하였듯이 무심천 유역 내에는 HSPF 모형에 사용할 수 있는 유량과 수질 관측지점이 무심천 하류에 1개소씩 밖에 없어 해당 지점의 자료로부터 보정과 검증이 완료된 모형을 이용하였다.

택지개발사업 전후의 토지피복 상태와 2015년도의 강우사상 조건에서 모형을 재구동하여 일별 유량과

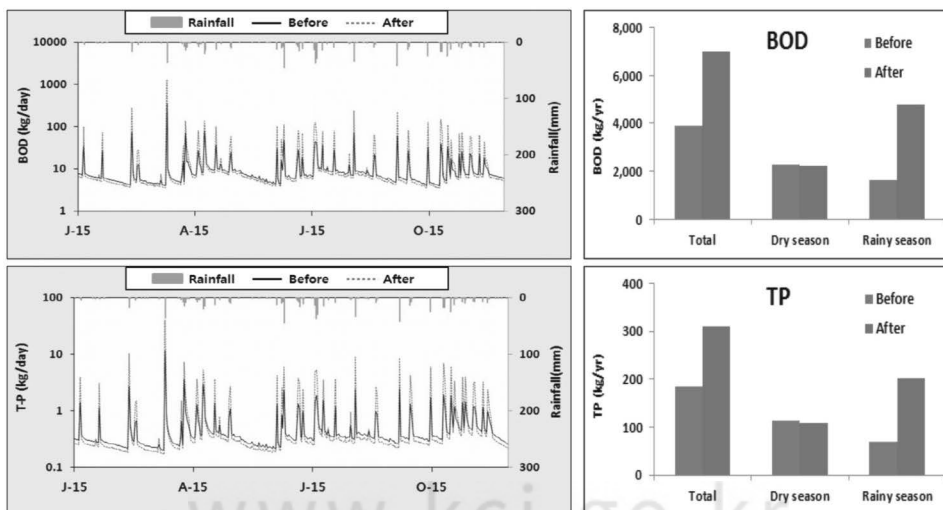


Figure 8. Comparison of daily and annual pollutant loads before and after development of Wolun sub-basin.

BOD, TP 농도를 구하였고, 유량과 농도를 곱하여 일별 총오염부하량을 산정하였다(Figure 8~Figure 9).

그림에서와 같이 사업 후 BOD와 TP의 총오염부하량을 보면 강우 시에는 사업 전보다 증가하지만, 비강우 시에는 사업 전에 비하여 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 불투수면이 증가하면 강우 시 지표유출량은 상승(Schueler, 1987)하는 반면 토양 침투량은 줄어들어 비강우 시에는 유역 유출량이 감소하기 때문이다. 이와 같이 강우 유무에 따라 일별 오염부하량은 다양한 변화를 보이지만 사업 후의 강우 시 증가량이 비강우 시 감소량보다 월등히 많아 연간 총부하량은 두 항목 모두 큰 폭으로 증가하여 다수의 연구자들(Lee 2010; Choi et al, 2008; Park et al, 2008)과 비슷한 결과를 얻었다. 하천별 BOD와 TP의 연간 총부하량의 증가율은 월운천의 경우 80%와 69%이고, 울량천은 28%와 44%로 산정되었다. 월운천이 울량천보다 높은 증가율을 보이는 이유는 월운천의 유역면적과 개발면적이 더 넓고, 유역경사가 가파르며, 개발지역이 하류에 집중된 결과로 판단된다.

3) 비점오염부하량의 변화

사업지역인 월운천과 울량천 소유역의 비점오염부하량을 산정하기 위해 보정과 검증이 완료된 HSPF

모형에서 오폐수량과 점오염부하량 값을 “0”으로 입력한 후 모형을 재구동하여 해당 지역의 비점오염부하량을 산정하였다(Lee et al, 2012; Kim et al, 2013). 본 연구에서는 두 종류의 비점오염부하량을 구하였는데 첫 번째는 개발사업을 시행하기 전의 비점오염부하량이고, 두 번째는 개발사업이 완료되었을 때 점오염원은 개발 전과 동일하고 불투수면의 증가만이 있다는 가정 하에 얻은 비점오염부하량이다.

Figure 10~Figure 11은 개발 전의 총오염부하량과 비점오염부하량 그리고 개발 후의 비점오염부하량을 일별 및 연간 부하량으로 비교한 그림이다. 그림을 보면 총오염부하량 변화와 같이 비강우 시에는 비점오염부하량이 감소하지만 강우 시에는 급증하는 것을 볼 수 있다. 또한 개발 전의 총오염부하량과 개발 후의 비점오염부하량을 비교해 보면 전자에 비해 후자가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 개발 전의 점오염원이 동일하고, 불투수면만 증가한다는 전제에서 모의한 결과임에도 불구하고 개발 후의 비점오염부하량이 개발 전의 총오염부하량보다 크다는 것을 의미하기 때문에 불투수면이 급증하는 유역의 관리를 위해서는 계획 단계에서부터 저영향개발(Low Impact Development, LID)과 최적관리기법(Best Management Practices, BMPs)의 적용이 필요하다는 것을 보여준다.

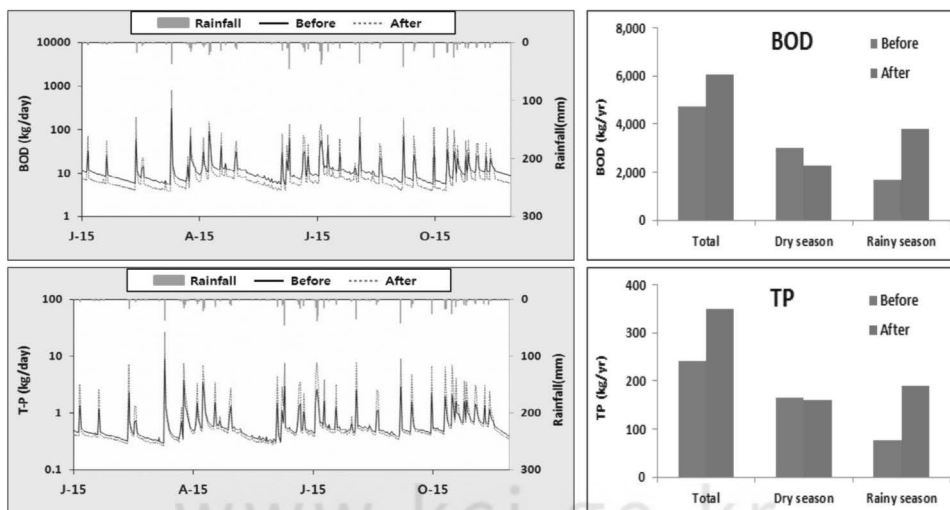
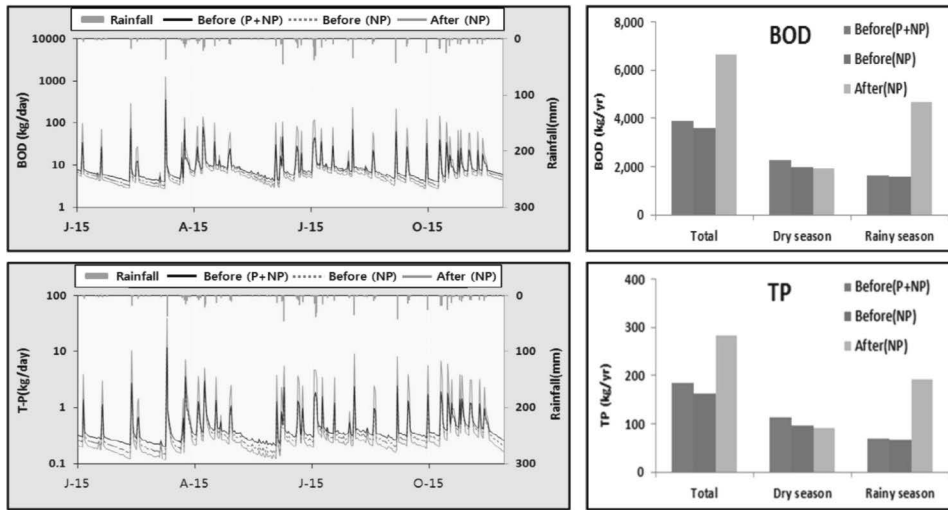
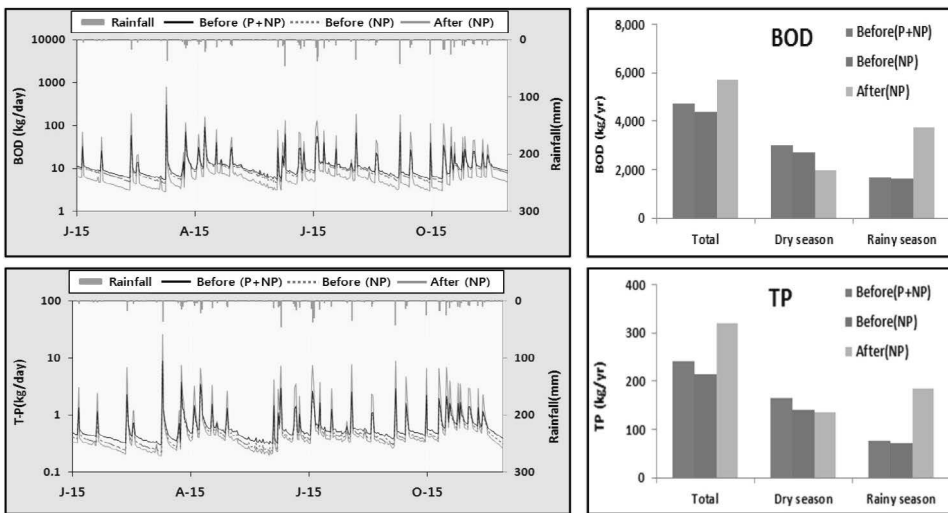


Figure 9. Comparison of daily and annual pollutant loads before and after development of Yulryang sub-basin.



(P : point source, NP : non-point source)

Figure 10. Comparison of daily and annual non-point sources pollutant load before and after development of Wolun sub-basin.



(P : point source, NP : non-point source)

Figure 11. Comparison of daily and annual non-point sources pollutant load before and after development of Yulyang sub-basin.

IV. 결론

청주시 관류하천인 무심천을 대상으로 유역 내 대규모 택지개발이 계획된 월운천과 울랑천 소유역의 토지피복 상태를 변경하여 불투수면이 증가할 경우 오염물질의 유출에 어떤 영향을 미치는지 HSPF 모

형을 이용하여 평가하였다. 모형의 보정은 2015년도 관측치, 검증은 2014년도 관측치를 기준으로 하였고, 모의항목은 유량, BOD, TP를 대상으로 하였으며, 모형의 보정 및 검증 결과는 모든 모의항목이 성공적으로 수행되었다. 모형에 사용한 토지피복도는 무심천 유역의 2015년도 토지이용 현황을 반영하여 수정

한 후 개발지역의 계획 위치와 면적을 적용하여 모의하였다. 모의 결과 일별 총오염부하량은 불투수면이 증가하면 강우 시에는 개발사업 전보다 증가하고, 비강우 시에는 감소하는 결과를 얻었다. 연간 총오염부하량은 강우 시 증가량이 비강우 시 감소량보다 월등히 많아 BOD와 TP의 연간 증가율은 월운천의 경우 80%와 69%이고, 울량천은 28%와 44%로 산정되었다. 또한 비점오염부하량은 개발 전의 점오염원이 동일하고, 불투수면만 증가한다는 전제에서 모의한 결과 개발 후의 비점오염부하량이 개발 전의 총오염부하량보다 크게 산정되어 불투수면이 급증하는 유역은 계획 단계에서부터 비점오염원의 관리대책이 필요한 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2016~2017학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었습니다.

References

- Arnold Jr. CL, Gibbons CJ. 1996. Impervious surface coverage: The emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62(2): 243-258.
- Choi J, Kim B, Park B, Chung E. 2008. Applicability of Impervious Cover Index for Water Environment Management, *Journal of Korea Society on Water Quality*, 24(6), 767-772.[Korean Literature]
- Donigian AS. 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.
- Jang SH, Choi JY, Lee JH. 2005. A Case Study on Correlation of Water Quality and Impervious Cover Rates in Watersheds-Focused on An-Yang Cheon, Kyung-An Cheon, Bok-Ha Cheon Watersheds, *Seoul Studies*, 6(3), 15-27.[Korean Literature]
- Kim TG, Kim MJ. 2013. Estimation of Sediment Delivery Ratio in Upper Geum River Basin Using Watershed Model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(6), 695-703.[Korean Literature]
- Lee B-Y. 2010. Effect of Impervious Cover on the Environment Quality of Kyeong-An Stream, Master Dissertation, Myong-Ji University.[Korean Literature]
- Lee EJ, Kim TG. 2012. Evaluation of Applicability for Nonpoint Discharge Coefficient using Watershed Model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(3), 339-352.[Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2014. A research on control targets and strategies for impervious surface management(I).[Korean Literature]
- Park J-Y, Lee MS, Lee YJ, Kim SJ. 2008. The Analysis of Future Land Use Change Impact on Hydrology and Water Quality Using SWAT Model, *Journal of Civil Engineering*, 28(2B), 187-197.[Korean Literature]
- Schueler TR. 1987. Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs, Washington Metropolitan Water Resources Planning Board.

Schueler TR. 1994. The importance of
imperviousness. Watershed Protection

Techniques, Center for Watershed
Protection. 1(3): 100-111.