

# 소하천에서의 비점오염원 유출특성

## Runoff Characteristics of NPS in small watershed

신민환\*, 최재완\*\*, 이재정\*\*\*, 이재안\*\*\*\*, 최종대\*\*\*\*\*

MinHwan Shin, JaeWan Choi, JaeJung Lee, JaeAn Lee, JoongDae Choi

### 요 지

호소의 수질오염 문제를 해결하기 위해선 우선 소하천에서 강우유출에 의한 비점오염물질이 어디서 얼마나 발생하는지에 대한 정량적인 조사가 필요하다. 그러나 유역의 오염원에 대한 정량적인 조사가 이루어지면 많은 비용과 시간 그리고 노력이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대청호 상류유역의 소하천인 안내천을 대상으로 강우유출수 조사를 실시하고, 높은 예측 정확성 때문에 세계적으로 널리 쓰이고 있는 Long-Term Hydrologic Impact Assessment(L-THIA)을 이용하여 실측데이터와 L-THIA 모델의 결과를 비교하였다. 안내천의 유역면적은 16.5 km<sup>2</sup>로 유역의 약 69.5%가 산림, 농업 및 초지지역이 25.3% 그리고 주거지역이 2.6%로 조사되었다. 수질분석을 위하여 자동수질시료채취기(ISCO sampler 6712)를 설치하여 시간단위의 시료를 채취한 뒤 수질농도를 측정하였다. 수질항목은 유기물질인 BOD<sub>5</sub>, TOC, T-N, T-P 항목에 대하여 수질오염 공정시험법으로 분석하였다. WHAT 시스템을 이용하여 분리된 직접유출량은 315.5~161,835.1 m<sup>3</sup>의 범위로 나타났다. 직접유출량을 이용하여 산정한 유역의 EMC 농도는 안내천 유역의 EMC<sub>BOD</sub>는 1.0~2.4 mg/L, EMC<sub>TOC</sub>는 1.429~5.491 mg/L, EMC<sub>COD</sub>는 2.2~10.2 mg/L, EMC<sub>TN</sub>은 2.906~10.864 mg/L, EMC<sub>TP</sub>는 0.029~0.285 mg/L의 범위를 보였다. 또한 실측된 유량과 농도를 이용하여 산정한 오염부하는 안내천 유역이 BOD<sub>5</sub> 37.9~390.9 g, COD<sub>Mn</sub> 0.8~1,657.5 g, TOC 0.54~791.83 g, T-N 0.968~1,758.174 g, T-P 0.011~42.139 g의 범위로 나타났다. L-THIA 모델을 이용하여 직접유출량의 산정된 결과와 실측 결과를 비교·분석한 결과 결정계수와 유효지수가 0.95와 0.93으로 높게 나타나 대청호 상류유역에서 발생하는 유출량을 모의하는데 적절할 것으로 판단된다. 토지이용도와 토양도 그리고 일 강우자료만으로 구축되는 L-THIA 모델을 이용하여 대청호 상류의 소하천 유역에 대하여 비점오염원 유출특성을 해석하는 것이 가능 할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 비점오염원, 오염부하, EMC, L-THIA 모델

### 1. 서 론

비점오염원은 강우가 발생한 뒤 토양으로 침투하지 못하고 토양이나 오염원들과 함께 하천으로 유입되는 것을 말하며, 다양한 발생원으로 인한 처리의 어려움 때문에 수계에서의 상대적인 비중이 커져가고 있다. 비점오염원은 우리나라 중부권의 중요한 수자원 역할을 하고 있는 대청호 유역에도 영향을 미치고 있다. 대청호는 대청호 상류의 각 시·시군에서 발생하는 점오염원 등과 산림 및 경작

\* 정회원 · 금강물환경연구소 · E-mail : uv2000wind@korea.kr  
\*\* 정회원 · 금강물환경연구소 · E-mail : cjw2000@korea.kr  
\*\*\* 비회원 · 금강물환경연구소 · E-mail : jjlee@korea.kr  
\*\*\*\* 비회원 · 금강물환경연구소 · E-mail : leejanier@korea.kr  
\*\*\*\*\* 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 · E-mail : jdchoi@kangwon.ac.kr

지 등의 비점오염원으로 인해 부영양화와 조류발생이 심화되고 있다(권 등, 2002). 대청호 수역내에 웨어를 설치하여 조류성장 억제에 대한 연구(김 등, 2007)와 대청호 유역의 수질관리를 위한 연구 등을 통하여 대청호 수질관리 대책을 위한 선행연구가 이루어져왔다. 그러나 상류유역의 수질변화가 대청호에 미치는 영향 및 모델링을 통한 영향분석에 관한 연구사례가 거의 없는 실정이다. 오염원에 대한 정량적인 조사는 실측 유량과 농도를 조사하여 토지이용별로 오염원을 산정하는 방법이 가장 정확하지만, 많은 비용과 시간 그리고 노력이 필요하다. (Shin et al., 2008). 유출량을 모의하기 위해 사용되는 많은 모델 중 유출곡선지수를 이용하여 직접유출을 모의하는 Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) ArcView GIS 모델이 U.S. EPA와 Purdue 대학교 연구진의 공동연구에 의해 개발되어 널리 활용되고 있다. L-THIA ArcView GIS 모델은 간단한 자료(토지이용도, 토양도, 일강우 자료)를 이용하여 직접유출의 모의가 가능한 장점이 있고, 어느 정도의 높은 예측 정확성으로 인하여 현재 전 세계적으로 널리 이용되고 있다 (Kim et al., 2007). 따라서 본 연구에서는 대청호 상류의 소하천 유역을 대상으로 실측 모니터링을 통한 데이터와 L-THIA ArcView GIS 모델을 이용한 데이터를 비교 분석하고, 대청호 상류유역의 오염물질량을 모의 및 평가하였다.

## 2. 연구 방법

대청호 유역의 연평균 강수량과 대청호로 유입되는 유입량은 1,230.0 mm와 95.6 m<sup>3</sup>/s이고, 총 저수량과 유효저수량은 1,490×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>과 790×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이다. ArcGIS 프로그램과 수치지도 그리고 토지이용도를 이용하여 산정된 안내천의 유역면적은 16.5 km<sup>2</sup>로 유역의 약 69.5 %가 산림, 농업 및 초지지역이 25.3 % 그리고 주거지역이 2.6 %로 조사되었다. 월외천의 유역면적은 9.9 km<sup>2</sup>로 유역의 80.51 %가 산림, 농업 및 초지지역이 16.1 %로 조사되었다(Fig. 1).

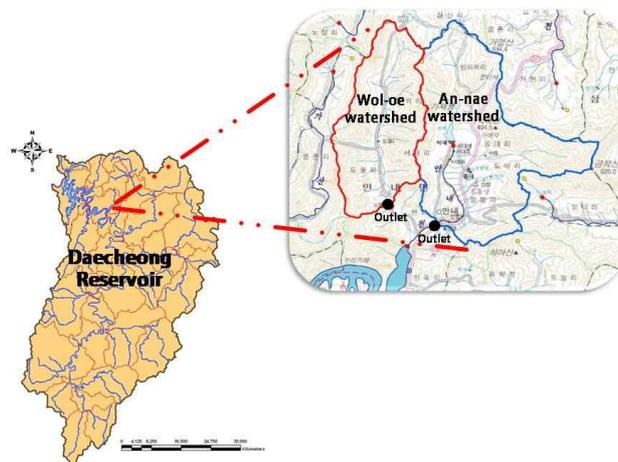


Fig. 1 Sketch of An-nae and Wol-oe watershed

강우시 발생하는 강우유출수 조사기간은 2009년 3월 11일부터 동년 8월 13일까지이다. 수위측정을 위한 수위계 (YSI 6600)를 설치하여 수위변화를 측정하고, 수위의 변화가 발생하였을 때 유량계 (Flowtracker)를 이용하여 실측 유량을 측정하였다. 수질항목은 유기물질인 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TOC,

T-N, T-P 항목에 대하여 수질오염공정시험법으로 분석하였다. 측정된 실측 농도와 유량자료를 이용하여 Numeric Integration (NI) 방법으로 오염부하를 산정하였다. 또한 각 강우사상별 유량가중평균 농도 (Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였다. L-THIA ArcView GIS 시스템의 입력자료에는 토지이용현황, 수문학적 토양그룹, 그리고 장기 일강우량자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 안내천과 월외천 유역의 토지이용도와 토양도, 그리고 2009년 1월 1일부터 2009년 9월 1일까지의 일강우량 자료를 모형의 입력자료로 구축하였다. 토지이용도는 환경부 환경지리정보 (EGIS)에서 배포하는 2000년 1/25,000의 대분류 수치 토지피복도 자료를 이용하였다(Fig. 1, 2). 유역의 토지이용 및 토양배수 특성에 따라 주어진 일 강수량 중 유효우량을 산정하기 위하여 우선 직접유출량과 기저유출량을 분리하여야 한다. 직접유출량과 기저유출량을 분리하기 위하여 WHAT Web GIS 시스템을 사용하였다. 사용된 WHAT Web GIS 시스템은 웹브라우저만을 이용하여 손쉽게 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있는 시스템이고, 사용자가 입력 자료를 직접 준비할 필요 없이 미국 국립지리국의 유량 자료를 실시간으로 질의하여 수문분석을 수행하는 사용자 중심 시스템이다 (Lim et al., 2005). WHAT 시스템은 수문곡선의 감수곡선 자료를 이용하여 WHAT 최적화 모듈로 유역내 최적의 BFI<sub>max</sub>값을 산정하는 Digital filtering 방식이며, 기존의 Digital filtering 방식에 비해 보다 유역 내 특성을 반영한 객관적이고 현실적인 방식의 수문분석이다 (Kim et al., 2007). WHAT 시스템은 수문곡선의 감수곡선 자료를 이용하여 WHAT 최적화 모듈로 유역내 최적의 BFI<sub>max</sub>값을 산정하는 Digital filtering 방식이며, 기존의 Digital filtering 방식에 비해 보다 유역 내 특성을 반영한 객관적이고 현실적인 방식의 수문분석이다 (Kim et al., 2007). 본 연구에서는 안내천과 월외천의 강우시 산정된 유출량을 이용하여 직접유출/기저유출 분리 후 L-THIA ArcView GIS 모형의 입력자료로 사용하였다. L-THIA ArcView GIS 모형을 검·보정 하기위하여 보정모의기간을 생장기 (growing season)와 휴면기 (dormant season)로 구분하였다. 생장기는 4월 15일~10월 15일로 분류하였고, 휴면기는 1월 1일~4월 14일와 10월 16일~12월 31일로 분류하였다. 분류한 기간을 기준으로 선행토양함수조건 (AMC, Antecedent Moisture Condition)에 따른 토지이용별 CN값을 산정하였다.

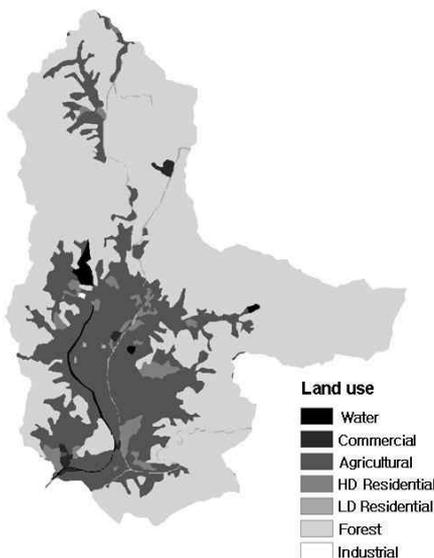


Fig. 1. Land uses at An-nae watershed

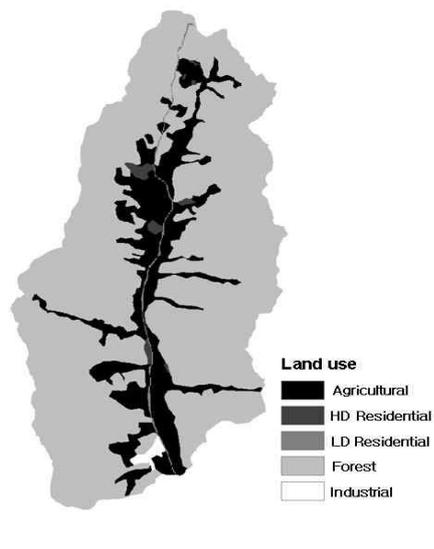


Fig. 2. Land uses at Wol-oe watershed

대청호는 호수형 호수로서 팔당호와 같은 하천형 호수들과는 달리 강우시 직접유출에 의한 오염물질의 유입과 축적이 조류증식 및 수질오염에 많은 영향을 미치고 있다. 따라서 본 연구에서는 직접유출을 이용하여 EMC와 오염부하량을 산정하였다. 측정된 실측 농도와 유량자료를 이용하여 Numeric Integration(NI) 방법으로 오염부하를 산정하였다(식 (1)). 또한 식 (2)를 이용하여 각 강우사상별 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였다.

$$Load = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (1)$$

여기서,  $c_i$  는  $i$ 번째 샘플의 농도이고,  $q_i$  는 구간유량,  $t_i$  는  $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는  $i$ 번째 샘플로써 표현되는 시간구간이다(Shin et al., 2009).

$$EMC (mg/L) = \frac{\int_0^n Q(i) \times C(i) di}{\int_0^n Q(i) di} \quad (2)$$

여기서,  $Q(i)$ 는  $i$ 번째의 구간별 유량( $m^3$ )이고,  $C(i)$ 는  $i$ 번째 분석된 수질항목 농도( $mg/L$ ),  $n$ 은 각 강우사상마다 분석된 시료의 개수이다.

### 3. 결 론

연구기간 중 7월 한 달 동안 발생한 강우량은 연구기간동안 발생한 총 강우량의 40 %가 넘는 404.0 mm가 집중하여 발생하였다. 7월 14일 18시부터 동월 15일 04시까지 발생한 총 강우량은 157.5 mm로 조사되었고, 이때 강우강도는 14.3 mm/hr로 매우 높게 나타났다. 모니터링은 선행건기일수(Antecedent Dry Day, ADD)에 관계없이 강우유출수 조사를 실시하였다. 연구기간 내에 조사된 유출량 자료를 WHAT 시스템을 이용하여 직접유출량과 기저유출량으로 분리한 후 L-THIA ArcView GIS 모형의 적용성 평가시 사용하였다. 측정된 직접유출량은 안내천 유역이 8.0~84.0 mm의 강우량이 발생한 동안 315.50~161,835.10  $m^3$ 의 범위로 나타났고, 월외천 유역이 8.0~157.5 mm의 강우량이 발생한 동안 156.99~478,704.34  $m^3$ 로 나타났다. 직접유출량을 이용하여 산정한 안내천 유역의  $EMC_{BOD}$ 는 1.0~2.4 mg/L,  $EMC_{TOC}$ 는 1.429~5.491 mg/L,  $EMC_{COD}$ 는 2.2~10.2 mg/L,  $EMC_{TN}$ 은 2.906~10.864 mg/L,  $EMC_{TP}$ 는 0.029~0.285 mg/L의 범위를 보였다. 월외천 유역의  $EMC_{BOD}$ 는 0.3~3.3 mg/L,  $EMC_{COD}$  0.9~37.1 mg/L,  $EMC_{TOC}$ 는 0.678~13.456 mg/L,  $EMC_{TN}$  1.734~15.089 mg/L,  $EMC_{TP}$  0.006~1.146 mg/L범위를 보였다.  $EMC_{COD}$ 와  $EMC_{TP}$ 는 월외천 유역이 안내천 유역보다 큰 것으로 조사되었다. 안내천 유역의 경우 월외천보다 유역면적이 크지만, 안내천에서 발생하는 유출수는 논의 용수로 사용되기 위해 우회수로를 통하여 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구지점과 같은 농촌유역을 포함하고 있는 유역의 경우 농번기에 논이나 밭에 사용되는 수량이 적지 않기 때문에 오염부하에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 실측된 유출량을 이용하여 분리된 직접유출량과 L-THIA ArcView GIS 모형으로 산정한 직접 유출량 자료를 비교·분석한 결과 안내천 유역의 결정계수(Coefficient of determination:  $R^2$ )와 유효지수(EI)는 0.81과 0.71로 나타났고, 월외천 유역의 결정계수( $R^2$ )와 유효지수(EI)는 0.95와 0.93으로 나타났다(Fig. 3, 4). 결정계수와 유효지수는 월외천 유역이 높은 수치로 나타나 월외천 유역이 안내천 유역보다 유출량 모의가 잘 된 것으로 판단된다.

안내천 유역의 경우 농번기에 측정된 유량자료가 사용되어 오차가 발생한 것으로 판단된다.

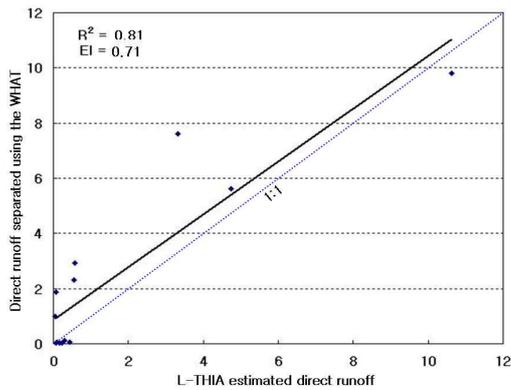


Fig. 3.  $R^2$  and EI at An-nae watershed

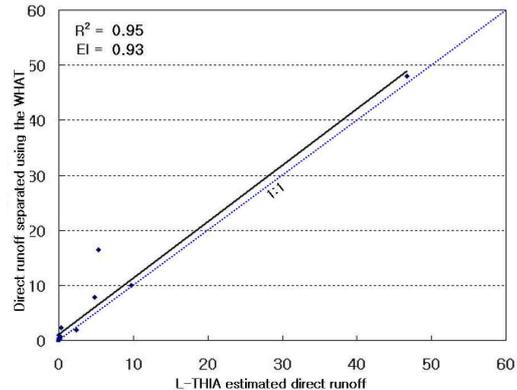


Fig. 4.  $R^2$  and EI at Wol-oe watershed

CODMn 항목의 경우 안내천과 월외천 유역을 대상으로 EMC와 오염부하를 산정하였으나, L-THIA ArcView GIS 모형에는 아직까지 구축이 되어있지 않기 때문에 적용성 평가는 하지 않았다. 안내천 유역에서 산정된 오염부하량의 BOD<sub>5</sub> 결정계수 ( $R^2$ )는 0.94, TOC는 0.81, T-P는 0.89 그리고 T-N은 0.94로 나타났다. 또한 월외천 유역에서 산정된 오염부하량의 BOD<sub>5</sub> 결정계수 ( $R^2$ )는 0.80, T-N은 0.86 그리고 T-P는 0.65로 나타났다. 본 연구의 결과로 월외천 유역의 T-P 항목이 다소 낮게 나타나 T-P 항목을 제외하고는 L-THIA ArcView GIS 모형으로 산정된 오염부하량이 실측치를 잘 반영 하는 것으로 나타났다. L-THIA ArcView GIS 모형은 본 연구에서의 입력자료(일강우량, 토지이용도, 수문학적 토양그룹)와 같이 간단한 입력자료들을 통해 대청호 상류 유역의 유출 및 비점오염 부하를 해석하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Kwon, Y. H., S. I. Han, and J. B. Lee, 2002. Pollution Loadings in DaeChungHo Watershed. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater* 16(5): 581-595.
2. Shin, M. H., Y. C. Shin, S. G. Heo, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2008. Characteristics of Nonpoint Source Pollutant Loads from Forest watershed with Various Water Quality Sampling Frequencies. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(2): 65-71.
3. Kim, J. G., Y. S. Park, J. H. Jeon, A. E. Bernard, J. H. Ahn, Y. K. Park, K. S. Kim, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2007b. Evaluation of L-THIA WWW Direct Runoff Estimation with AMC Adjustment. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(4): 474-481.
4. Lim, K. J., Engel, B. A., Tang, Z., Muthukrishnan, S, Choi, J. and Kim, K. 2005. Effects of calibration on L-THIA GIS(<http://pasture.ecn.purdue.edu/~sprawl/>) runoff and pollutant estimation, *Journal of Environmental Management*, 78:35-43.