L-THIA를 이용한 낙동강수계 임하댐유역 비점오염원의 공간적 분포해석

Spatial Analysis of Nonpoint Source Pollutant Loading from the Imha dam Watershed using L-THIA

전지홍* · 다니엘차** · 최동혁* · 김태동*†

Jeon, Ji-Hong · Cha, Daniel K. · Choi, Donghyuk · Kim, Tae-Dong

ABSTRACT

Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) model which is a distributed watershed model was applied to analyze the spatial distribution of surface runoff and nonpoint source pollutant loading from Imha watershed during 2001~2010. L-THIA CN Calibration Tool linked with SCE-UA was developed to calibrate surface runoff automatically. Calibration (2001~2005) and validation (2006~2010) of monthly surface runoff were represented as 'very good' model performance showing 0.91 for calibration and 0.89 for validation as Nash-Sutcliffe (NS) values. Average annual surface runoff from Imha watershed was 218.4 mm and Banbyun subwatershed was much more than other watersheds due to poor hydrologic condition. Average annual nonpoint source pollutant loading from Imha watershed were 2,295 ton/year for BODs, 14,752 ton/year for SS, 358 ton/year for T-N, and 79 ton/year for T-P. Amount of pollutant loading and pollutant loading rates from Banbyun watershed were much higher than other watersheds. As results of analysis of loading rate from grid size (30 m×30 m), most of high 10 % of loading rate were generated from upland. Therefore, major hot spot area to manage nonpoint source pollution in Imha watershed is the combination of upland and Banbyun subwatershed. L-THIA model is easy to use and prepare input file and useful tool to manage nonpoint source pollution at screening level.

Keywords: Automatic calibration; curve number; event mean concentration; L-THIA; nonpoint source pollution

1. 서 론

비점오염원이란 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 오염원으로 정의되며 오염물질의 유출 및 배출경로가 명확하게 구분되지 않아 수집이 어렵고 발생량 및 배출량이 강수량 등 기상조건에 크게 좌우되기 때문에 처리시설의 설계 및 유지관리가 어렵다는 특징이 있다 (MEV, 2006). 비점오염물질은 2010년 하천오염부하율의 약 68 %를 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 2020년에는 약 72 %에 달하는 것으로 전망되어 하천수질관리에 있어 비점오염원관리가 중요한 요인이 될 것으로 판단된다 (NIER, 2010). 최근 기후변화에 따른 국지성 강우가 증가하는 추세를 나타내고 있으며 기후변화에 따른 강우특성변화는 비점오염물질 유출을 증대시킨다. 특히 2011년에 이러한 경향이 뚜렷하게 나타났는데,

2011년 7월 25일 강우를 시작으로 28일까지 내린 우리나라 중부지방의 집중호우로 인하여 시간당 수심에서 113 mm의 강우가 쏟아지면서 강우로 인한 막대한 피해가 발생하였다. 2012년 8월에는 태풍 볼라벤과 덴빈이 한꺼번에 한반도를 강타하였다. 서남부지방의 큰 강우량으로 인해 큰 피해가 발생하였는데, 진도의 경우 이틀동안 244 mm의 강우가 내렸으며, 목포에도 시간당 30 mm가 넘는 물폭탄으로 13년 만에 물에 잠겼다.

효율적인 비점오염원의 관리를 위해서는 비점오염부하량의 정량화 뿐만 아니라 비점오염의 공간적인 분포 파악이 중요하며 이러한 분석을 위해 널리 사용되는 방법이 모델의 적용이다. 최근 들어 우리나라에서도 하천의 수질관리에 있어 비점오염부하량의 중요성이 인식되고 이에 따른 다양한 유역모델이 적용되고 있다. 우리나라에서 대표적으로 널리 사용되고 있는 유역모델에는 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)과 Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) 등이 있다. HSPF와 SWAT은 유역모델의 복잡성의 기준으로 분류하면 상세모델 (detail model)로 분류되어 유역에서의 다양한 현상을 상세히 모의할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, HSPF와 SWAT모델 모두 모델 적용을 위해서 많은 시간과 노력을 필요로 하며, 입력자료를 준비하고 모델의 검·보정과정에 있어서 고도의 전문성을 요구한다. 또한 격자기반의 분포형 모델이 아니기 때문에 분포형

* 안동대학교 환경공학과

** 델라웨어대학교 토목환경공학과

† Corresponding author Tel.: +82-54-820-5895

Fax: 82-54-820-6437

E-mail: tdkim@andong.ac.kr

2012년 11월 9일 투고

2012년 12월 24일 심사완료

2013년 1월 2일 게재확정

Fig. 1 (a) Overview of the L-THIA GIS system (Lim et al. 2006), (b) L-THIA ArcView GIS system (Kim et al., 2009)

모델과 비교해 볼 때 유출량이나 오염물질 부하의 공간적인 분포 파악에 한계점을 가지고 있다. Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) 모델은 미국의 퍼듀대학교에서 개발된 분포형 모델이다. 유출곡선 (Curve Number; CN)식과 유량가중 평균농도 (Event Mean Concentrations; EMCs)를 이용하여 유역에서의 직접 유출량과 비점오염부하량을 예측하는 모델로 입력자료가 간단하고, 모델의 적용이 용이하여 우리나라에서도 다양한 유역에 적용된 바 있다. 대청호 상류 (Shin et al., 2010), 도암댐 유역 (Kim et al., 2010), 낙동강 유역 (Kim, 2006), 금호강 유역 (Kim et al., 2009), 서울한강 유역 (Jeon, 2011) 등에 L-THIA 모델이 적용된 바 있다. L-THIA 모델의 정확성을 향상시키는 연구도 진행되나 있는데, Kim et al. (2007)은 경사도에 따른 CN값 재조정을 통하여 L-THIA 모델의 유출량 예측시 정확성을 향상시킨 바 있다. Jeon et al. (2009)은 최적화 기법 중의 하나인 SCE-UA를 L-THIA 모델에 연계·적용하여 유출량에 대한 CN값을 자동보정할 수 있도록 L-THIA 모델을 개선하였다. SCE-UA의 연계적용은 낙동강내 장기유출자료가 제공되는 7개 소유역 (Jeon et al., 2009)과 한강유역내 서울한강 중권역 (Jeon, 2011), 임하호유역 (Jeon et al., 2011)에 적용하여 유출량을 예측한 바 있다.

본 연구에서는 낙동강 임하댐 유역을 대상으로 유출량을 보정시킨 후 L-THIA 모델을 적용함으로써, 임하댐 유역의 유출량 및 비점오염부하량의 공간적인 분포를 파악하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA)

L-THIA 모델은 장기간동안의 토지이용 변화가 유출량 및 비

Fig. 2 Web based L-THIA system (<https://engineering.purdue.edu/~lthia/>)

점오염부하량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 미국 퍼듀대학교에서 개발된 분포형 유역모델로서 모델의 입력자료가 간단하고, 비교적 사용이 용이한 모델이다 (Engel, 2005). 토지이용도와 토양배수도를 이용하여 CN값을 계산하고 일별 강수량 자료를 이용하여 일별 직접유출량을 계산한다. 현재 GIS기반의 모델 (Fig. 1)과 Web기반의 모델 (Fig. 2)이 개발되어 사용되고 있다. Kim et al. (2009)은 미국에서 개발된 L-THIA 모델내 토지이용도 분류를 우리나라 환경부에서 분류하는 토지이용 중분류를 그대로 적용할 수 있도록 모델을 수정함으로써 우리나라에서의 L-THIA 적용성을 향상시킨 바 있다. 본 연구에서는 Kim et al. (2009)이 개발한 우리나라에 적용할 수 있도록 수정된 L-THIA 모델을 적용하였다.

2. 연구대상지역

연구대상지역은 낙동강유역내 존재하는 임하호 유역으로 임하호 유역 말단에 국내 호수 가운데 8번째로 큰 임하댐이 조성되어 있다 (Fig. 3). 임하호 유역은 유역면적이 1,361 km², 유역평균폭이 17.48 km, 유역평균 경사가 40.26 %로 반변천을 포함한 지방1급 하천과 용전천을 포함한 지방2급 하천으로 구성되어 있다. 임하호 유역 하천 총길이는 5,741.14 km이고 시작점 표고와 출구점 표고는 각각 814.97 m와 88.96 m로서 726.01 m의 표고차를 나타내고 있다. 임하호 유역의 말단에 조성된 임하댐은 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미의 영향으로 임하호 내 고탁수의 수질이 사회적인 문제로 대두된바 있었으며, 수질환경보전법 제 54조에 의하여 2007년 8월 23일자로 소양호, 도암호, 광주광역시를 포함하여 임하호는 우리나라 최초로 비점오염원관리지역으로 지정된 바 있다. 본 연구에서는 임하호 유역을 반변천 유역과 용전천유역, 댐유역으로 구분하여 분석하였다.

3. 입력자료 구축

L-THIA 적용을 위해서는 GIS 형태의 토지이용도와 토양배수도, 모형의 입력값으로 일별 강수량자료, 모형의 자동보정을 위해서는 일별 직접유출량 자료를 필요로 한다. 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 이용하였으며, 토양배수도는 농업과학연구원에서 제공하는 정밀토양도를 이용하였다. 일별 강

수량 자료는 수자원공사에서 운영하고 있는 임하호유역내 8개의 강수량자료를 이용하였다. 일별 직접유출량 자료는 수자원공사에서 제공하는 호내 유입유량자료를 직접유출량과 기저유출량을 분리해 주는 Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT; <https://engineering.purdue.edu/~what/>)을 이용하여 직접유출량을

Fig. 3 Study area

Fig. 4 Hydrologic soil group (a) and land use classification (b)

산정하였다. 임하호 유역에 대한 토지피복도와 토양배수도는 Fig. 4와 같다.

4. 연구접근방법

L-THIA에 의해 임하호 유역에서의 유출량 및 비점오염부하량을 예측하기 위해서는 CN값과 EMCs값을 결정해야 한다. CN값 도출은 실측치를 이용한 모델 검·보정 과정을 통해서 도출하였다. CN값의 검·보정은 모델의 자동보정에 사용되는 전역적 최적화기법인 SCE-UA기법을 이용하였다. L-THIA 모델과 SCE-UA 기법 연계적용을 통한 CN값 자동보정은 Kim et al. (2009)과 Jeon et al. (2009, 2011)에 적용된 바 있으며 본 연구에서는 L-THIA CN Calibration Tool을 개발하여 GIS기반의 L-THIA 모델 입력자료를 자동생성 할 수 있도록 하였다. 모델의 유출량 보정은 5년 (2006~2010년)으로 하였으며, 검증은 2001~2005년을 대상으로 하였다. 모델 보정 및 검증에 대한 목적함수는 수문모델의 모델효율을 계산하는데 널리 이용되는 Nash-Sutcliffe coefficient (Nash and Sutcliffe, 1970)를 이용하였으며 식 (1)과 같다.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \text{avg } Q_{obs,i})^2} \quad (1)$$

여기서, Q_{obs} 는 실측직접유출량, Q_{sim} 은 모의직접유출량, $\text{avg } Q_{obs}$ 는 평균실측직접유출량이다. NS값은 1에 가까울수록 모델효율이 높은 것을 의미한다.

Imhadam Basin Commission (2012)에서는 임하호 유역내에 다양한 지점에 대한 모니터링과 SS항목에 대하여 HSPF 모델을 적용하여 부하량을 산정한 바 있다. 2010~2011년 동안 임하호

Table 1 Summary of water sampling at wet season during 2010~2011

Date		Rainfall (mm)	EMCs (mg/L)	
			T-N	T-P
2010	05.22~05.25	67.9	3.45	0.17
	08.10~08.12	75.3	3.31	0.11
	08.15~08.16	54.4	4.60	0.12
	09.06~09.08	41.1	1.53	0.08
	09.10~09.13	50.1	3.12	0.14
2011	05.10~05.13	121.7	2.94	0.33
	06.23~06.27	181.0	2.85	0.39
	07.08~07.11	114.9	2.43	0.12
	08.17~08.19	55.2	2.65	0.35

유역내 존재하는 반변천 유역에서 강우시 측정한 유출량과 영양물질농도를 이용하여 각 강우사상별 EMCs를 산정하고 강우사상별 예측된 유출량을 곱하여 비점오염부하량을 산정하고 이를 실측부하량으로 간주하여 모델 보정을 하였다. 총 7회 강우사상에 대하여 일주기 조사를 실시하였으며 일주기 조사는 유량의 변화를 고려하여 총 6회 실시되었으며 Table 1에 요약되어 있다.

SS 항목에 있어서는 일주기 조사자료에 의해 검보정된 HSPF 모델의 예측결과 (Imhadam Basin Commission, 2012)를 이용하여 L-THIA 모델을 보정하였으며, HSPF에 의해 예측된 2001~2010 동안의 임하호 유역으로 유입되는 SS 부하량은 Table 2와 같다.

Table 2 Annual SS load to Imha Dam estimated HSPF model (Imhadam Basin Commission, 2012)

Year	SS load (ton/year)	Year	SS load (ton/year)
2001	22,100	2006	61,700
2002	165,000	2007	26,400
2003	79,900	2008	25,900
2004	86,500	2009	48,100
2005	37,200	2010	22,300

Table 3 EMC from document for L-THIA application in Korea (unit: mg/L)

Code	Description	T-N	T-P
110	Residential	11.42	1.62
120	Industrial	4.01	0.31
130	Commercial	11.29	1.69
140	Leisure	1.26	0.28
150	Transportation	5.07	0.58
160	Public building	4.19	0.63
210	Paddy	3.93	0.28
220	Upland	2.21	0.82
230	Greenhouse	2.70	4.00
240	Orchard	4.78	0.59
250	Other crops	4.58	0.42
310	Deciduous forest	0.23	0.07
320	Coniferous forest	0.23	0.07
330	Mixed forest	0.23	0.07
410	Pasture	0.70	0.01
420	Golf course	1.29	1.33
430	Other grass	0.70	0.01
510	Inland wetland	1.38	0.08
520	Costal wetland	1.38	0.08
610	Mining area	1.53	0.21
620	Other barren	1.25	0.05

Source: Kim et al., 2009

Fig. 5 Flow chart of L-THIA application

우리나라에서 실측기반으로 측정된 Table 3의 EMCs를 L-THIA모델에 입력하여 부하량을 예측하였으며, 비점오염원에 대한 모델의 보정시 수질항목별 보정계수를 곱하여 EMCs를 변화시켜 예측치를 보정하였다.

L-THIA CN Calibration Tool에 의해 최적화된 CN값은 GIS기반의 L-THIA모델의 입력파일인 CN_table.txt를 자동생성하고 GIS기반의 L-THIA모델을 적용하여 2001~2010년 동안의 연평균 유출량과 비점오염부하량의 공간적인 분석을 수행하였다 (Fig. 5).

III. 결과 및 고찰

1. L-THIA CN Calibration Tool 개발

Kim et al. (2009)에 의해 개발된 L-THIA와 SCE-UA연계 프로그램을 개선한 L-THIA CN Calibration Tool의 초기화면은

Fig. 6 L-THIA CN Calibration Tool

Fig. 6과 같다. 개선된 내용으로는 결과파일은 크게 3개의 파일 (Sim.txt, Opt_Para.txt, CN_Table.txt)로 구분된다. Sim.txt는 시계열에 따른 실측치와 예측치를 출력한 파일이다. Opt_para.txt는 모델효율결과와 최적화된 CN값을 정리한 출력파일이다. CN_Table.txt는 GIS기반의 L-THIA 입력파일로 최적화된 CN값을 이용하여 L-THIA입력파일을 직접 생성된 파일이다. 모의 옵션에서 사용하는 보정과 검정을 선택할 수 있으며, 보정시에는 세 개의 파일을 새롭게 생성하며, 검정시에는 보정에서 생성된 Opt_para.txt에서 최적화된 CN값들을 읽어 들여, 목적함수를 계산하고 Opt_para.txt를 새롭게 생성한다.

2. 유출량 검·보정 결과

임하호유역에 대한 월별 직접유출량의 검·보정 결과는 Fig. 7과 같으며, 월별 유출량에 대한 실측치와 예측치의 1:1 분산도는 Fig. 8과 같다. 검·보정결과 월별 예측치에 대한 모델효율 NS값

Fig. 7 Calibration and validation results of monthly surface runoff

Fig. 8 Scatter plots of calibrated (a) validated (b) monthly surface runoff

Table 4 Statistical analysis for calibrated and validated monthly surface runoff

	Calibration	Validation
Determine coefficient (R^2)	0.93	0.89
Nash-Sutcliffe coefficient (NS)	0.91	0.89

Table 5 Determine coefficient value ranges for model performance

	Poor	Fair	Good	Very Good
Daily flows	< 0.60	0.60~0.70	0.70~0.80	> 0.80
Monthly flows	< 0.65	0.65~0.75	0.75~0.85	> 0.85

은 각각 0.91, 0.89로 나타났으며, 결정계수는 각각 0.93, 0.89로 나타났다 (Table 4). Donigan and Love (2003)은 예측치와 실측치 사이의 결정계수에 따른 모델 예측치의 정확도를 제시하였는데 (Table 5), 검·보정 모두 0.85 이상을 나타내어 본 연구에서 수행된 CN값의 검·보정 모두 '매우 좋음 (Very good)'인 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 도출된 임하호 유역의 토지이용별 대표 CN 값은 Table 6과 같다. USDA의 문헌 (USDA, 1985)을 참조하여 CN값에 의한 토지피복특성을 추정된 결과 밭의 경우 작물 경작지 중 가장 유출율이 높은 '배수상태가 불량한 상하경 (row crops with straight row treatment and poor hydrologic condition)'의 특성을 나타냄으로써 고랭지 밭의 높은 유출율 특성을 잘 반영한 것으로 판단된다.

3. 비점오염부하량 보정 결과

강우사상별 영양물질과 연간 SS 부하량에 대한 L-THIA모델

Table 6 Optimized CN parameter by L-THIA linked with SCE-UA

		Hydrologic soil group			
		A	B	C	D
Residential area		88	92	94	95
Other urban area		89	93	94	95
Paddy field		65	74	81	84
Upland		69	83	90	94
Other crops area		66	80	87	90
Deciduous forest		38	60	69	75
Coniferous forest		45	71	82	88
Mixed forest		43	68	79	85
Pasture		53	74	85	90
Open space		50	67	76	80
5-day rainfall (mm)	Growing season	< 25.0		AMC I	
		25.0~55.4		AMC II	
		55.4<		AMC III	
	Dormant season	< 11.3		AMC I	
		11.3~14.3		AMC II	
		14.3>		AMC III	

의 보정결과는 각각 Fig. 9와 Fig. 10과 같다. 영양물질의 보정 결과 T-N과 T-P, SS의 결정계수는 각각 0.70, 0.65, 0.82를 나타내었다. T-P 보다 T-N이 1:1선에 밀집해 있었는데, 이는 비점오염원으로써 유출특성의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 질소의 경우는 토양에 흡착되어 유출되기 보다는 대부분이 용존성 형태로 유출되기 때문에 지표유출량에 따른 농도변화가 크지 않지만 인의 경우에는 토양에 흡착되어 유출되는 성분이 많기 때문에 지표유출량에 따라 농도가 변하는 특성을 가지고 있

Fig. 9 Scatter plots of calibrated nutrient load

(a) SS calibration using evently load

(b) SS calibration using yearly load

Fig. 10 Scatter plots of calibrated SS load

기 때문에 (Jeon et al., 2001) 강우사상별 L-THIA모델 보정시 수질항목별 EMCs를 얼마나 잘 반영하느냐에 따라 보정의 결과에 영향을 줄 것으로 판단된다. 또한 L-THIA모델 보정시 강우사상별 부하량을 이용한 보정보다는 연간 부하량을 이용한 보정이 보다 신뢰성이 높을 것으로 판단된다. 이는 강우량 혹은 강우강도에 따라 SS 농도가 크게 좌우되기 때문에 강우사상에 따라 EMCs가 큰 차이가 나타나며 연간 부하량 측면에서는 EMCs의 차이가 상대적으로 작을 것으로 판단된다. Fig. 10에서 이러한 특성을 잘 반영하였는데, 강우사상별 SS 부하량을 이용하여 L-THIA를 적용하였을 경우보다는 연간 SS 부하량을 이용하여 L-THIA를 적용하였을 경우 보정결과가 더 좋게 나오는 것으로 나타났다.

4. 유출량 공간적 분포 파악

임하호 유역에 대한 CN값과 10년 (2001~2010년) 연평균 유출량에 대한 공간적인 분포도는 Fig. 11과 같다. 임하호 유역 전체 평균 CN값은 80으로 나타났으며, 반변천 유역과 용전천 유역, 기타 유역의 CN값은 각각 82, 76, 78인 것으로 나타나 반변천 유역에서의 CN값이 높은 것으로 나타났다 (Table 7). 이에 따른 임하호 유역 전체 직접유출량은 218.4 mm인 것으로 나타났으며, 반변천 유역과 용전천 유역, 기타유역의 연평균 직접유출량은 각각 235.7 mm, 201.5 mm, 192.5 mm인 것으로 나타났다 (Table 7). Table 7은 토양배수상태 A, B, C, D를 1, 2, 3, 4와 같이 수치화하여 유역별 평균 토양배수상태를 나타낸 결과이다. 반변천유역과 용전천 유역, 기타유역의 평균 토양배수상태를 수

Fig. 11 Spatial distribution of CN and surface runoff at Imha watershed

Table 7 Average CN, runoff, and hydrologic soil group by subwatershed

	Banbyun	Yongjeon	Other	Total
Hydrologic soil group	3.4	3.1	2.4	3.1
CN	82	78	76	80
Runoff (mm)	235.7	201.5	192.5	218.4
Runoff rate	23 %	19 %	19 %	21 %

치화한 값은 각각 3.4, 3.1, 2.4이며 반변천 유역은 C그룹, 용전천 유역은 C그룹, 기타유역은 B에 가까운 것으로 나타났으며 유역전체에 있어서는 C그룹에 가까운 것으로 나타났다. 따라서, 반변천유역이 다른 유역에 비해 높은 유출율을 나타내는 이유는 토양배수상태의 차이로 기인한 것으로 나타났으며, 반변천 유역이 다른 유역에 비해서 토양배수상태가 불량한 것으로 나타났다.

5. 비점오염부하 공간적 분포 파악

임하호유역의 10년 (2001~2010년) 동안의 연평균 SS, T-N, T-P 비점오염부하량의 공간적인 분포도는 Fig. 12와 같다. 오염물질은 전반적으로 하천주변을 따라 높은 부하율을 나타내었는데 이는 하천을 주변으로 발달한 농경지가 주요원인이다. 특히 이러한 특성은 SS부하에서 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 임하

Table 8 Nonpoint source loading from Inha watershed (unit: ton/year)

	Banbyun	Yongjeon	Other	Total
SS	42,012 (62 %)	14,907 (22 %)	10,842 (16 %)	67,761
T-N	747 (51 %)	337 (23 %)	381 (26 %)	1,790
T-P	127 (58 %)	51 (23 %)	42 (19 %)	246

Table 9 Nonpoint source loading from land use category (unit: ton/year)

	Urban	Agriculture	Forest	Others	Total
SS	6,637 (10 %)	56,343 (83 %)	4,582 (7 %)	200 (0 %)	67,761
T-N	410 (28 %)	789 (54 %)	228 (16 %)	38 (2 %)	1,790
T-P	34 (16 %)	132 (60 %)	44 (20 %)	10 (5 %)	246

호 유역으로 유입되는 비점오염부하량은 67,761 SS ton/yr, 1,790 T-N ton/yr, 246 T-P ton/yr인 것으로 나타났으며, 반변천에서 가장 많은 부하량을 나타내었다 (Table 8).

임하댐 유역에서 비점오염부하량이 차지하는 토지이용도별 기

Fig. 12 Spatial distribution of nonpoint source loading from Imha watershed

Fig. 13 Spatial distribution of high 10 % NPS loading rate

여도는 Table 9와 같다. SS, T-N, T-P 항목 모두 농경지에서 가장 높은 기여도를 나타내었는데, 토양유실과 관련된 SS항목에서 가장 높은 83 % 비중을 차지하였으며, 다음으로 토양과 함께 토양에 흡착되어 유출되는 T-P항목이 60 % 차지하였으며, T-N

Table 10 Yearly unit load of Imha watershed (unit: kg/km²/year)

	Banbyun	Yongjeong	Other	Total
SS	58,770	41,045	29,495	55,820
T-N	1,175	1,025	735	1,040
T-P	117	135	93	180

항목이 농경지에서의 기여율이 54 %인 것으로 나타났다.

임하호 유역의 단위면적당 연간 비점오염부하량은 SS, T-N, T-P 각각 55,820 kg/km²/year, 1,040 kg/km²/year, 180 kg/

Table 11 Land use component of 10 % of total area with high NPS loading rate (unit: %)

	BOD	SS	T-N	T-P
Upland*	86	88	80	86
Urban	14	12	14	14
Paddy	-	-	6	-

* includes upland, orchard, other crop

(a) Image map

(b) SS load map

(c) T-N load map

(d) T-P load map

Fig. 14 Example of spatial analysis using L-THIA and open image map

km²/year인 것으로 나타났다 (Table 10). 단위면적당 부하량은 반변천유역에서 가장 높은 값을 나타내었으며, 다음이 용전천유역, 댐유역 순으로 나타났다. 댐유역의 경우 수체가 차지하는 비율이 상대적으로 크기 때문에 가장 낮은 값을 나타내었다.

임하호 유역내 비점오염유발지역을 파악하기 위하여 각 계산 격자 (30 m×30 m)별 비점오염 부하량이 높은 순으로 정렬하고, 면적기준으로 전체면적의 10 %에 해당하는 상위지역에 대한 공간적인 분석결과는 Fig. 13과 같다. 상위 10 %의 부하율을 나타내는 지역 중 토지이용상태를 분석한 결과 비점오염부하량 항목에 따라 80 %~88 %가 밭 것으로 나타났다 (Table 11). 본 연구결과에서도 임하호 유역에서의 비점오염부하량 유발 지역이 밭인 것으로 나타났다.

Fig. 14는 L-THIA모델 결과와 인터넷상에서 제공되고 있는 이미지 지도를 이용하여 비점오염부하량의 공간적인 분포를 다른 모델에 비해 얼마나 직관적으로 분석할 수 있는지를 보여주고 있다. 모델사용자는 L-THIA 모델결과와 이미지 지도를 이용하여 비점오염부하가 많이 일어나는 지역을 지형학적으로 손쉽게 분석할 수 있을 뿐만 아니라, 농민들의 경작상태, 토지노출현황 등을 이미지 지도를 이용하여 개략적으로 파악할 수 있어 최적관리기법을 설정하거나 비점오염원 처리시설 설치장소 등을 파악하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 L-THIA 모델은 축산지역의 비점오염부하량이 현저하지만 토지 이용도에 축산지역이 구분하지 못할 경우에는 이를 반영할 수 없을 경우에는 L-THIA 모델의 사용에 주의를 요한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 임하호 유역내 비점오염부하의 공간적인 분포를 파악하기 위하여 GIS 기반의 L-THIA모델을 이용하여 과거 10년 (2001~2010)동안의 연평균 유출량 및 비점오염부하량을 산정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 모델의 정확성을 높이기 위해서 유출량 자동 보정을 위하여 L-THIA모델과 전역적 최적화 프로그램인 SCE-UA을 연계시킨 L-THIA CN optimization tool을 개발하고 월별 직접유출량을 자동 보정시킨 결과 모델 보정 (2001~2005)시 모델효율이 0.91, 검정 (2006~2010)시 0.89를 나타내어 자동보정 프로그램 적용 시 보다 정확한 직접유출량 예측이 가능한 것으로 나타났다.

2. 임하호 유역의 직접유출량 유출특성에 대한 공간적인 분포특성을 파악한 결과 임하호 유역 전체 평균 CN값은 80인 것으로 나타났으며, 2001~2010년간 연평균 직접 유출량은 218.4 mm인 것으로 나타났다. 유역별 유출특성을 분석한 결과 반변천유역에서 상대적으로 높은 유출율을 나타내었는데 이는 반변천유역이 용전천 유역과 댐유역보다 토양배수상태가 불량했기 때

문인 것으로 나타났다.

3. 임하호 유역의 비점오염부하 유출특성에 대한 공간적인 분포특성을 파악한 결과 임하호 유입되는 비점오염부하량은 BOD, SS, T-N, T-P 각각 2,295 ton/year, 14,752 ton/year, 358 ton/year, 79 ton/year인 것으로 나타났으며, 유역별로는 반변천, 용전천, 댐유역순으로 높은 부하량을 나타내었다. 단위면적당 부하율 또한 반변천유역에서 네 가지 수질항목 모두 높게 나타났다.

4. 격자단위 (30 m×30 m)기준으로 단위면적당 부하량을 상위 10 %를 선정한 결과 상위 10 %의 대부분이 밭지역에서 유출되는 것으로 나타내어 밭에서의 비점오염원 관리가 중요한 것으로 나타났다.

유역에서의 비점오염원관리를 위해서 간단한 모형에서부터 상세한 모형까지 많은 모형들이 개발되고 이용되고 있다. 비점오염원 관리를 위해서는 비점오염원을 유발시키는 주요지점과 원인 파악이 선행되어야 한다. 이러한 측면에서 L-THIA모델은 사용이 간단하고 비점오염원의 공간적인 분석 파악이 용이하기 때문에 비점오염원 유발지점을 파악하는데 사용가능하다. 뿐만 아니라, 본 연구에서 개발된 CN값 자동 검·보정 프로그램을 사용하면 보다 정확한 L-THIA모델 결과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문은 2010학년도 안동대학교 국제학술교류보조금에 의하여 연구되었음

REFERENCE

1. Donigan, A. S. and J. T. Love, 2003. Sediment calibration procedures and guidelines for watershed modeling. WEF TMDL 2003, November 16-19, 2003. Chicago, Illinois. *WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM*.
2. Engel, B. A., 2005. L-THIA NPS Version-2.3. Purdue University. USA.
3. Imhadam Basin Commission. 2012. Management and analysis of the effective of control measures for reducing soil erosion from Imha watershed (in Korean).
4. Jeon, J. H., C. G. Yoon, and J. H. Ham, 2001. Analysis of relationships among the pollutant concentrations in non-urban area. *Korean Journal of Limnology* 34(3): 215-222.

5. Jeon, J. H., T. Kim, and D. Choi, 2011. Regionalization of CN values at Imha watershed with SCE-UA. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(5): 9-16.
6. Jeon, J. H., 2011. Analysis of spatial distribution of surface runoff in Seoul city using L-THIA: Case study on event at July 27, 2011. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 171-183.
7. Kim, J. G., Y. S. Park, J. W. Seok, R. J. Chul, H.W. Kang, K. S. Kim, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2010. Comparison of estimated direct runoff using SWAT and L-THIA in the Doam-dam Watershed. *The KCID Journal* 17(1): 35-42.
8. Kim, J., K. J. Lim, Y. Park, S. Heo, J. Park, J. Ahn, K. S. Kim, and J. Choi, 2007. The effect of slope-based Curve Number adjustment on direct runoff estimation by L-THIA. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(6): 897-905.
9. Kim, J. J., T.D. Kim, D. H. Choi, K. J. Lim, B. A. Engel, and J. H. Jeon, 2009. L-THIA modification and SCE-UA application for spatial analysis of nonpoint source pollution at Gumho River Basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(2): 311-321.
10. Kim, D. S., 2006. A study on the estimation of nonpoint source pollution source load using GIS and L-THIA models. M.S. Thesis, Daegu, Ind.: Yeungnam University (in Korean)
11. MEV, 2006. A handbook of management of nonpoint source pollution. 11-1480000-000750-01. Ministry of Environment, Korea (in Korean).
12. NIER, 2010. National wide estimation and predict of nonpoint source pollution. National Institute of Environmental Research, Korea (in Korean).
13. Shin, M. H., J. A. Lee, S. U. Cheon, Y. J. Lee, K. J. Lim, and J. Choi, 2010. Analysis of the Characteristics of NPS runoff and application of L-THIA model at upper Deacheong Reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 1-11.
14. USDA, 1986. Urban Hydrology for Small Watershed. Technical Release 55. Conservation Engineering Division, Natural Resources Conservation Service, USDA.