

환경부 토지피복 중분류 적용을 위한 L-THIA 모델 수정과 SCE-UA 연계적용에 의한 금호강유역 비점오염 분포파악

김정진 · 김태동 · 최동혁 · 임경재^{*} · 버나드엔겔^{**} · 전지홍[†]

안동대학교 환경공학과
^{*}강원대학교 지역건설공학과
^{**}미국 퍼듀대학교 농공학과

L-THIA Modification and SCE-UA Application for Spatial Analysis of Nonpoint Source Pollution at Gumho River Basin

Jung-Jin Kim · Tae Dong Kim · Dong Hyuk Choi · Kyoung Jae Lim^{*} · Bernard Engel^{**} · Ji-Hong Jeon[†]

Department of Environmental Engineering, Andong National University
^{*}Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University
^{**}Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University
(Received 29 December 2008, Revised 3 March 2009, Accepted 10 March 2009)

Abstract

Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) was modified to improve runoff and pollutant load prediction for Korean watersheds with changes in land use classification and event mean concentration produced from observed data in Korea. The L-THIA model was linked with SCE-UA, which is one of the global optimization techniques, to automatically calibrate direct runoff. Modified L-THIA model was applied to Gumho River Basins to analyze spatial distribution of nonpoint source pollution. The results of model calibration during 1991~2000 and validation during 1981~1990 for direct runoff represented high model efficiency of 0.76 for calibration and 0.86 for validation. As a results of spatial analysis of nonpoint source pollution, the BOD was mainly loaded from urban area but SS, TN, and TP from agricultural area which is mainly located along the stream. Modified L-THIA model improve its accuracy with minimum input data and application efforts. From this study, we can find out the L-THIA model is very useful tool to predict direct runoff and pollutant loads from the watershed and spatial analysis of nonpoint source pollution.

keywords : Curve number, EMC, L-THIA, Nonpoint source, Runoff, SCE-UA

1. 서론

급속한 산업발전과 도시화로 인해 국민들의 생활수준과 의식수준이 높아지면서 수환경에 대한 관심이 고조되고 있다. 수질오염은 유출되는 경로에 따라 점오염원과 비점오염원으로 구분하고 있으며 현재까지 우리나라에서는 유출경로가 명확한 점오염원 감소를 위한 하수처리장 건설 등의 투자에 중점을 두고 있었다(신창민 등, 2004). 하지만 최근 들어서 점차적으로 증가하고 있는 비점오염원이 수질오염에 끼치는 영향이 커지고 있으며 점오염에 대한 대책만으로는 수질개선이 곤란해지자 비점오염원에 대한 대책의 필요성이 제기 되었다. 이에 우리나라에서는 4대강 유역 비점오염원 관리 종합대책을 수립하여 2004~2020년까지 물 관리 대책과 연계하는 3단계 추진으로 비점오염원에 대한 법적근거를 마련하였으며, 환경영향평가, 도시·도로계획

규정 정비, 조사연구 및 홍보 등을 추진하여 종합관리대책상의 목표수질 달성을 위한 사업이 현재 진행 중이다(환경부, 2003). 하지만 비점오염원은 유출되는 범위가 너무 광범위하고 경로를 추정하기가 어려울 뿐만 아니라 오염원의 배출이 강우시에 주로 배출되기 때문에 오염에 대한 예측이나, 관리, 처리에 많은 어려움이 있다(이현동과 배철호, 2002).

비점오염원의 추정과 저감효과를 규명하기 위해서는 비점오염 부하량의 정확한 예측과 시·공간적인 분석이 매우 중요하다. 최근 들어 컴퓨터 발달로 인해 복잡한 자연계의 순환을 계산할 수 있는 수많은 모델들이 개발되어 비점오염원 관리에 유용하게 사용되어지고 있다(US EPA, 1997). 국내의 비점오염원 모의를 위한 연구동향을 살펴보면 비분포형 모델로는 SWAT이나 HSPF 등이 복잡한 단계의 유역 모델로써 하천수질모의가 가능하고 모델의 정확성이 높기 때문에 우리나라에 많이 사용 되었다. 특히 SWAT모델의 경우 많은 연구자들에 의해 적용성이 검증되었다(강덕호 등, 2007; 박윤식 등, 2007; 한건연 등, 2006). HSPF 모델 또한 소규모에서 대규모유역의 범위까지 모델의 적용성이

[†] To whom correspondence should be addressed.
jhjeon@andong.ac.kr

평가되었다(신아현, 2008; 윤춘경 등, 2007; 장재호 등, 2006; 황하선, 2007; Jeon et al., 2006; Jung, 2007). 또한, 비점오염원의 공간적 분포 파악이 상대적으로 용이한 분포형 모델 또한 국내 적용된 바 있다. 몇몇 연구자들은 AnnAGNPS 모형을 이용하여 대상 유역에서의 비점오염부하량을 예측한 바 있다(김만식과 정승권, 2000; 박윤희와 김태근, 2006; 심창석, 2004; 전민우 등, 2006). 그러나 AnnAGNPS와 같은 분포형 모델은 장기간 모의가 불가능하고, 입력자료가 방대하며 모델실행시간이 길어지는 단점을 가지고 있어 그 적용성에 한계를 드러내고 있다.

Long-Term Hydrologic Impact Assessment(L-THIA)모델은 분포형 모델로 사용이 간편하고 모의기간에 제한을 받지 않으며 ArcView GIS 기반을 이용한 모델로써 기존 GIS 자료들을 이용하여 사용할 수 있기 때문에 사용이 편리하다는 장점을 가지고 있어 도시화에 따른 수문변화 분석(Choi et al., 2003; Grove et al., 2001; Kim et al., 2002), 유역에서의 비점오염부하량 산정(Bhaduri et al., 2002), 다양한 유역관리 시나리오 분석(Tang et al., 2005a, 2005b), TMDL 개발(Choi et al., 2002) 등에 적용된 바 있으며, 우리나라에서도 L-THIA에 대한 적용성을 검토한 바 있다(김동성, 2006; 김종건 등, 2007a, 2007b; 임경재 등, 2003). 하지만 토지이용별 유출곡선지수(Curve Number, CN)와 강우사상 평균 농도(Event Mean Concentration, EMC)가 적용 대상지역을 대표하지 못할 경우 예측결과의 신뢰성이 결여될 수 있다는 단점을 가지고 있어 대상지역을 대표하는 CN값과 EMC값의 적용에 대한 필요성을 제기한 바 있다(Lim et al., 2006). 특히, L-THIA모델은 8개의 토지이용분류로 제한되어 있으며, EMC값이 미국에서 개발되어진 것을 그대로 사용하고 있기 때문에 우리나라 적용시에는 사용자의 주의를 요하고 있다.

본 연구에서는 기존의 L-THIA모델에서 적용 가능한 토지이용분류를 우리나라 환경부에서 분류한 중분류 토지이용분류와 일치시키고 4대강에 걸쳐 수행 중인 연구자료를 기반으로 우리나라에 적합한 토지이용별 EMC를 적용할 수 있도록 수정하였다. 또한 유출량의 정확한 예측을 위하여 최적화 기법인 SCE-UA와 연계·적용하여 수문보정을 자동적으로 수행할 수 있도록 수정하였다. 이렇게 수정된 L-THIA모델을 금호강 유역을 대상으로 과거 26년간의 모니터링 자료를 이용하여 모델의 검·보정을 실시하고 금호강 유역의 비점오염의 공간적인 분포를 파악하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

본 연구의 대상유역인 금호강 유역은 낙동강 중류부분에 위치하고 있는 지류로써 포항시 북구 죽장면 가사리 가시령에서 발원하여 영천시 자양면 성곡리에서 영천댐으로 유입 후, 영천시내를 거쳐 달성군 죽곡리에서 낙동강본류와 합류하는 하천이다. 행정구역별로는 영천시가 899.6 km², 대구광역시 523.0 km², 경산시가 397.5 km²를 차지하고 있으며 총 유역면적은 약 2,092 km²이다. 유로연장은 118.99 km이며 형상계수 1.32 정도로 본류의 경사는 완만하지만, 지류의 경사는 비교적 급한 편에 속한다. 대구광역시를 포함하는 전형적인 도시유역으로 과거 산업화와 도시화에 의해 수질오염이 크게 악화되어 1991~2000년 사이 낙동강 연평균 수질을 III급수이하를 만드는 주요지류였다(낙동강환경관리청, 2001; 박경훈 등, 2005). 현재까지 낙동강 본류의 금호강유역의 수질개선을 위하여 많은 노력과 비용을 투자한 결과 현재 현저한 수질개선 효과를 나타내고 있으나 여전히 낙동강수계의 수질적인 측면에서는 중요한 유역 중 하나이다. 본 연구에서는 금호강 유역을 Fig. 1과 같이 수질오염 총량제에서 구분한 세 개의 단위 유역으로 나누어서 분석하였으며, 각 단위유역별 특성은 Table 1과 같다. 금호A 유역의 경우 총 면적 928.55 km²중 산림이 전체의 70.73%를 차지하고 있고 농업이 21.44%, 도시지역이 3.22%를 차지하고 있다. 금호B 유역의 경우 유역 총 면적 441.47 km²중 산림이 49.96%를 차지하고 있으면 농업이 35.34%, 도시지역이 7.67%를 차지하고 있다. 금호C 유역은 총 722.66 km²중 산림이 62.42%를 차지하고 농업지역이 14.04%, 도시지역이 15.90%를 차지하고 있다. 금호A 유역은 전형적인 산림유역이며, 금호B 유역은 농업지역이며, 금호C 유역은 도시지역을 대표하고 있다. 대상유역의 연평균 강우량은 1,056.6 mm로써 이중 65.4%가 6~9월 사이에 집중되어 내리는 특징을 가지고 있다(대구지방환경청, 2007).

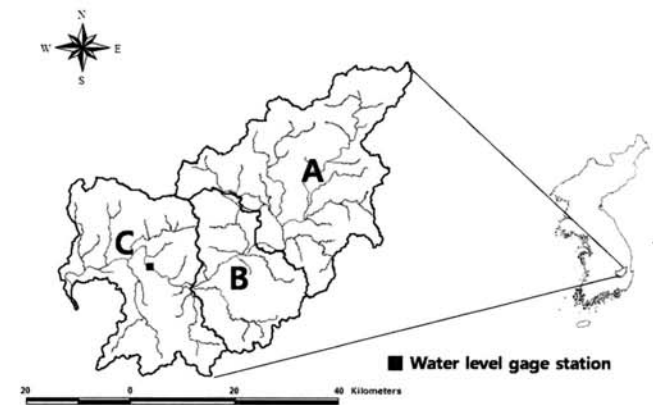


Fig. 1. Location of Gumho river basin.

Table 1. Land use of Gumho river basin

	Urban (km ²)	Agriculture (km ²)	Forest (km ²)	Others (km ²)
Gumho A	29.94 (3.22%)	199.10 (21.44%)	656.68 (70.73%)	42.83 (4.61%)
Gumho B	33.87 (7.67%)	156.02 (35.34%)	220.56 (49.96%)	31.02 (7.03%)
Gumho C	114.90 (15.90%)	101.45 (14.04%)	451.09 (62.42%)	55.22 (7.64%)
Total	178.71 (8.54%)	456.57 (21.82%)	1328.33 (63.48%)	129.07 (6.16%)

2.2. 연구 분석 방법

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

L-THIA 모델은 조작이 간단하고 장기간 실측 기상자료를 이용하여 토지로부터의 비점오염부하량과 직접유출량을 추정할 수 있는 분포형 유역모델이다(Engel, 2005). L-THIA 모델은 GIS기반의 분포형 유역모델로 토지이용도와 토양배수도를 이용하여 CN값을 계산하고 장기 강수자료를 이용하여 일별 유출량을 산정한다. 모의된 일별 직접 유출량과 토지이용별 EMC를 이용하여 비점부하량을 산정한다(김종건 등, 2007a). Fig. 2는 L-THIA 모형의 실행과정을 보여주고 있다.

2.2.2. 환경부 토지피복중분류에 적합한 L-THIA 모델 수정

L-THIA 모델 적용시 토지이용상태를 8개(수계, 상업지역, 공업지역, 농업지역, 고밀도주거지역, 저밀도주거지역, 초지, 산림)로 분류하여 적용한다(Lim et al., 1999). 현재 환경부에서 제공하는 토지피복도 23개 항목으로 기존의 L-THIA 모델을 적용하기 위해서는 8개의 토지이용상태로 재분류해야 하는 불편함을 가지고 있다. 특히, 유출이나 오염부하특성이 상이한 논과 밭이 구분되어 있지 않고 산림지역의 침엽수림, 활엽수림, 혼효림에 대한 구분이 없다. 전지홍 등(2009)은 낙동강 수계에 존재하는 8개의 유역을 대상으로 낙동강 수계를 대표하는 토지이용별 CN값을 제시한 결과 산림지역 중에서도 침엽수림, 활엽수림, 혼효림의 CN값들이 각각 뚜렷하게 다른 값을 나타내는 것으로 보고하고 있다. 논과 밭의 경우에도 우리나라에서 실측된 EMC의 값이 뚜렷한 차이가 있는 것으로 보고되고 있다(영산강·섬강강수계관리위원회, 2007; 한강수계관리위원회, 2007). 우리나라의 토지이용특성상 산림지역과 논이 가장 많은 비중을 차지하는 것을 감안할 때, 산림지역을 침엽수림과 활엽수림, 혼효림으로 구분하여 모델을 적용할 필요가 있으며, 농업지역도 논과 밭을 구분하여 적용할 필요성이 있다. 또한 보다 합리적인 비점오염부하량 적용을 위해서는 적용지역에 적합한 EMC 사용이 필요하다. 이를 위해 환경부에서

제공하고 있는 중분류 토지피복분류에 적합하도록 L-THIA 모델을 수정함으로써, L-THIA 모델 적용을 위한 토지이용재분류의 불편함을 제거하고 유출과 비점오염부하 특성이 상이한 토지이용상태를 분리하여 적용할 수 있도록 하였으며, 현재 4대강 유역에서 수행하고 있는 비점오염원 장기 모니터링 사업의 결과를 적극적으로 사용하여 우리나라에 적합한 EMC를 사용하도록 L-THIA 모델을 수정하였다.

2.2.3. 유출량 검보정을 위한 L-THIA 모델의 최적화 기법 연계 적용

보다 정확한 L-THIA 모델 적용을 위해서는 유출량에 대한 CN값의 검보정이 필요하다. 특히 미국에서 개발된 CN값은 토지이용별 유출특성이 상이한 우리나라에 검보정과정 없이 그대로 적용할 경우에는 그 사용에 신중해야 한다. 따라서, 월별 지표유출 실측값에 대한 CN값의 검보정을 위해서 최적화 기법 중에 하나인 SCE-UA 기법을 L-THIA 모델에 연계시켜 적용하였다. SCE-UA 기법은 미국의 에리조나 대학교에서 개발된 전역적 최적화 기법으로 수문모델을 컴퓨터 알고리즘에 의해 자동적으로 보정하는데 널리 사용되고 있는 기법으로, 우리나라에서도 전지홍 등(2009)이 낙동강 수계에 존재하는 8개의 유역을 대상으로 SCE-UA 기법을 적용하여 낙동강 유역을 대표하는 CN값을 도출한 바 있다. SCE-UA 기법의 흐름도는 Fig. 3과 같다. 각각의 complex에 콤플렉스의 개수(p)와 포인트의 개수(m)로 샘플의 크기(s=p×m)를 결정한다. 최적화 하고자하는 인자에 해당되는 샘플(s)을 적용하여 목적함수를 계산하여 순위를 결정하고 개체 s를 m개를 가지는 p개의 콤플렉스에 할당한다. 각각의 콤플렉스는 경쟁진화 알고리즘에 의해 진화되며 이 과정동안 얻은 진화된 세대는 새로운 콤플렉스를 형성하여 최적해로 수렴한다.

2.2.4. L-THIA 모델 적용을 위한 입력자료 구축

L-THIA 모델 적용을 위하여 GIS 자료 형태의 토지이용도와 토양도, 유출량 모의를 위한 일별 강수자료, 그리고 유

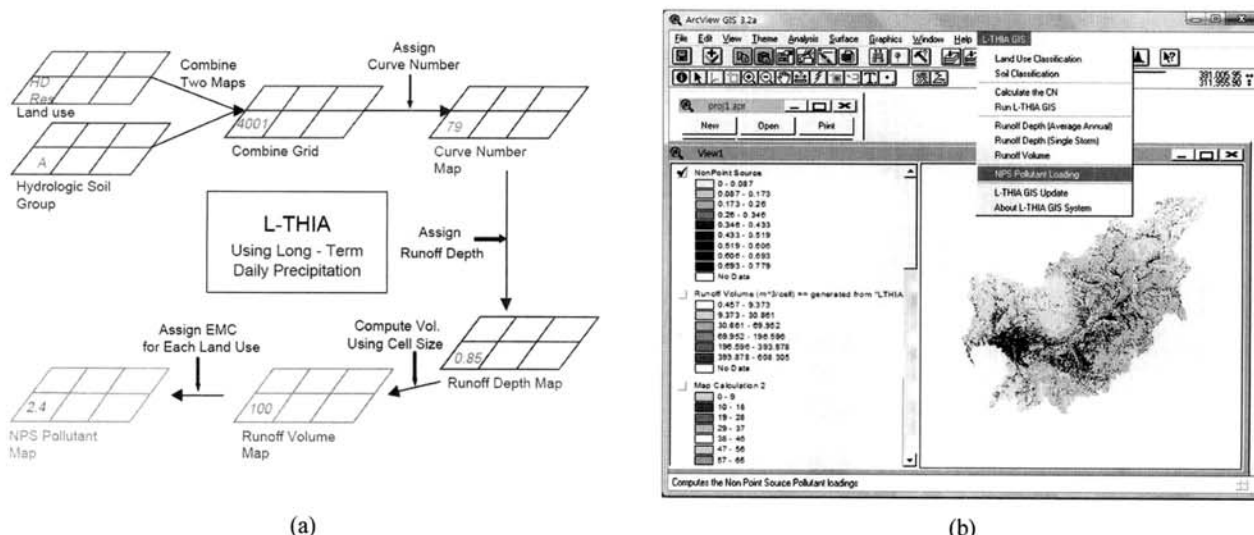


Fig. 2. (a) Overview of the L-THIA GIS system (Lim et al., 2006), (b) L-THIA ArcView GIS system.

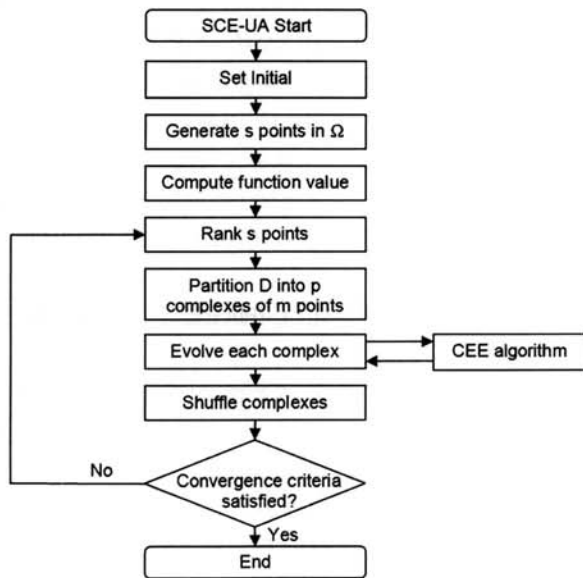


Fig. 3. Flow chart of SCE-UA algorithm(Dual et al., 1992).

출량 검보정을 위한 유량자료를 취득하였다. 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 사용하였고 토양배수도는 농과원에서 제공하는 정밀토양도를 이용하였다(Fig. 4). 강수량의 경우에는 기상청에서 운영하고 있는 측정소에 대하여 티센망을 생성하여 강수량자료를 사용하였다. 강수량자료는 1981~2006년까지의 일별 강수량자료를 사용하여 L-THIA 입력파일을 생성하였다.

2.2.5. 모델링 방법

본 연구에서의 L-THIA모델의 적용방법은 Fig. 5와 같다. 월별 지표유출량 검보정을 위하여 SCE-UA와 연계된 L-THIA모델은 연평균 유출량 및 부하량 산정을 위한 GIS 기반의 L-THIA모델과는 구분하여 적용한다. 토지피복도와 토양배수도를 GIS를 이용하여 중첩시켜 CN값을 할당하는데, NRCS에서 추천하는 토지이용별 CN값을 통계분석하여 최적화시 토지이용별 토양배수도별 CN값의 범위를 설정하였다(Table 2). NRCS에서 분류되지 않은 토지피복에 대해서는 몇몇 그룹을 묶어서 동일한 CN값을 사용하도록 하였

Table 2. The ranges of CN parameter recommended by NRCS

		Hydrologic soil group			
		A	B	C	D
Residential area	Min.	68	79	86	89
	Max.	90	93	95	96
Other urban area *	Min.	80	87	91	93
	Max.	95	96	97	98
Paddy field	Min.	61	70	77	80
	Max.	72	81	88	91
Upland	Min.	51	67	76	80
	Max.	77	86	91	94
Other crops area **	Min.	51	67	76	80
	Max.	77	86	91	94
Deciduous forest	Min.	30	55	70	77
	Max.	57	73	82	86
Coniferous forest	Min.	30	55	70	77
	Max.	57	73	82	86
Mixed forest	Min.	30	55	70	77
	Max.	57	73	82	86
Pasture ***	Min.	30	58	71	78
	Max.	68	79	86	89
Open space ****	Min.	39	61	74	80
	Max.	68	79	86	89

* Other urban area includes industrial, commercial, leisure, transportation, and public building
 ** Other crops area includes greenhouse, orchard, and other crop.
 *** Pasture includes pasture, golf course, and other grass.
 **** Open space includes inland and costal wetland, mining area, and other barren.

다. 다만 EMC 적용시에는 별도의 값을 사용하도록 하였다. 과거 10년(1991~2000)동안의 월별 지표유출량에 대하여 SCE-UA기법에 의해 CN인자값을 최적화하여 자동으로 보정하였으며, 보정된 CN인자값을 그대로 사용하여 1981~1990년 동안의 월별 지표유출량에 대하여 검정을 실시하였다. 유출량 검·보정지점은 금호강 유역내에 존재하는 건교부 유출량 측정지점 중에서 가장 하류에 존재하는 동천지점을 선택하였으며, 금호강 유역 출구점으로 부터 27.9

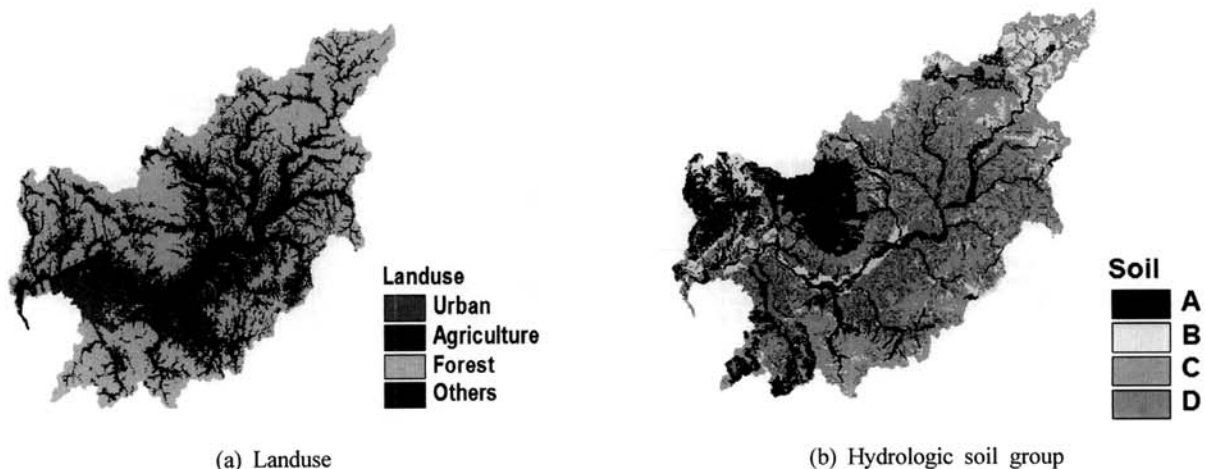


Fig. 4. Gumho river basin.

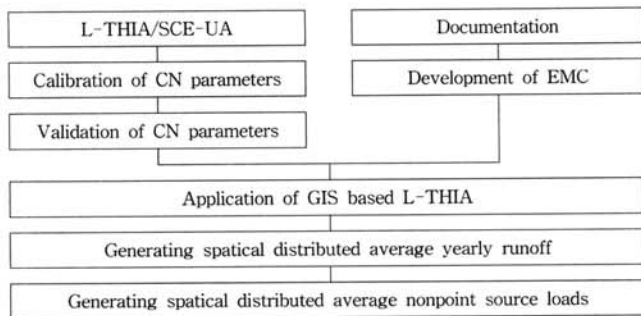


Fig. 5. Flow chart of L-THIA application.

km 상류에 위치한다(Fig. 1). 검·보정인 완료된 CN인자 값과 기존의 문헌조사를 통한 EMC값을 이용하여 GIS기반의 L-THIA모델 입력값으로 사용하였다. 환경부의 토지피복 중분류를 고려할 수 있도록 수정된 GIS 기반의 L-THIA 모델을 과거 26년(1981~2006년)에 대한 연평균 지표유출량과 비점오염부하량을 산정하여 GIS의 grid형태로 출력함으로써 연구대상지역에 대한 공간적인 분포파악을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 환경부 토지피복분류에 적합한 L-THIA모델 수정

환경부에서 제공하는 토지피복 중분류 적용을 위하여 L-THIA 모델을 토지피복 분류 23개 항목을 그대로 적용할

수 있도록 수정하였으며, 토지분류코드 또한 환경부 중분류 코드와 일치시킴으로써 L-THIA모델 적용을 위한 별도의 토지피복재분류와 같은 작업을 제거 시켰다(Table 3). 문헌 조사에 의한 토지이용별 BOD, SS, TN, TP에 대한 EMC는 Table 4와 같다. 그 결과 우리나라에서 실측된 자료만 기반으로 하였을 경우 도시지역의 경우, 주거지역과 상업지역, 교통지역에서, 농업지역에서는 밭에서, 초지에서는 골프장에서 상대적으로 높은 EMC를 나타내었다. 그러나 초지, 기타 초지, 기타 나지에 대해서는 자료의 불충분으로 인하여 부득이하게 외국의 자료를 사용하였다. Fig. 6은 환경부의 토지피복 중분류에 적합하도록 수정한 L-THIA모델의 적용과정을 나타내고 있다.

3.2. 유출량 검·보정 결과

금호강 유역을 대상으로하여 과거 20년 동안(1981~2000년) 월별 지표유출량에 대한 L-THIA모델의 검·보정 결과는 Fig. 7과 Fig. 8, Table 5와 같다. 보정결과 예측치와 실측치의 결정계수와 Nash-Sutcliffe(NS) 값은 각각 0.79, 0.76이었으며, 검정결과는 각각 0.90, 0.86으로 나타났다.

Donigian(2003)은 유출량의 예측치와 실측치의 결정계수에 따라 모델효율의 정도를 일별모의와 월별모의를 구분하여 제시하였다(Table 6). 그 기준에 따르면 본 연구에서의 보정결과는 좋음(good), 검정결과는 매우 좋음(very good)으로 검증결과가 오히려 보정결과 보다 좋게 나왔으며, 검·

Table 3. Land use code and description for L-THIA application

Original L-THIA		Modified L-THIA			
Land use code	Land use description	Land use Code	Land use description		
1000	Water	710	Fresh water		
		720	Seawater		
2000	Commercial	130	Commercial		
3000	Agricultural	210	Paddy		
		220	Upland		
		230	Greenhouse		
		240	Orchard		
		250	Other crop		
4000	HD residential	110	Residential		
5000	LD residential				
6000	Grass/Pasture	410	Pasture		
		420	Golf course		
		430	Other grass		
7000	Forest	310	Deciduous forest		
		320	Coniferous forest		
		330	Mixed forest		
8000	Industrial	120	Industrial		
		140	Leisure		
		150	Transportation		
		160	Public building		
		510	Inland wetland		
		520	Costal wetland		
		610	Mining area		
		620	Other barren		
		Not available			

Table 4. EMC from document for L-THIA application in Korea (unit: mg/L)

Code	BOD	SS	T-N	T-P	Code	BOD	SS	T-N	T-P
110 ¹⁾	53.00	150.20	11.42	1.62	310 ²⁾	2.70	12.40	0.68	0.03
120 ¹⁾	13.34	43.25	4.01	0.31	320 ²⁾	2.90	4.60	0.23	0.07
130 ¹⁾	68.54	151.71	11.29	1.69	330 ⁵⁾	1.11	18.28	3.37	0.04
140 ¹⁾	14.00	60.50	1.26	0.28	410 ⁷⁾	0.50	1.00	0.70	0.01
150 ¹⁾	54.81	146.05	5.07	0.58	420 ²⁾	9.00	6.50	1.29	1.33
160 ²⁾	10.15	198.28	4.19	0.63	430 ⁷⁾	0.50	1.00	0.70	0.01
210 ⁴⁾	8.39	19.46	3.93	0.28	510 ⁵⁾	4.00	6.00	1.38	0.08
220 ²⁾	19.21	231.30	2.21	0.82	520 ⁵⁾	4.00	6.00	1.38	0.08
230 ³⁾	4.60	78.75	2.70	4.00	610 ³⁾	6.66	63.39	1.53	0.21
240 ³⁾	3.55	44.78	4.78	0.59	620 ⁸⁾	1.50	11.10	1.25	0.05
250 ⁵⁾	4.24	282.50	4.58	0.42	710, 720	0.00	0.00	0.00	0.00

- 1) National institute of environmental research (2006)
- 2) Han river water supply management committee (2007)
- 3) Nack-Dong river water supply management committee (2007)
- 4) Young-San river and Sum-Jin river water supply management committee (2007)
- 5) Ministry of environment (1995)
- 6) International erosion control association (2002)
- 7) Baird and jennings (1996)
- 8) US EPA (2001)

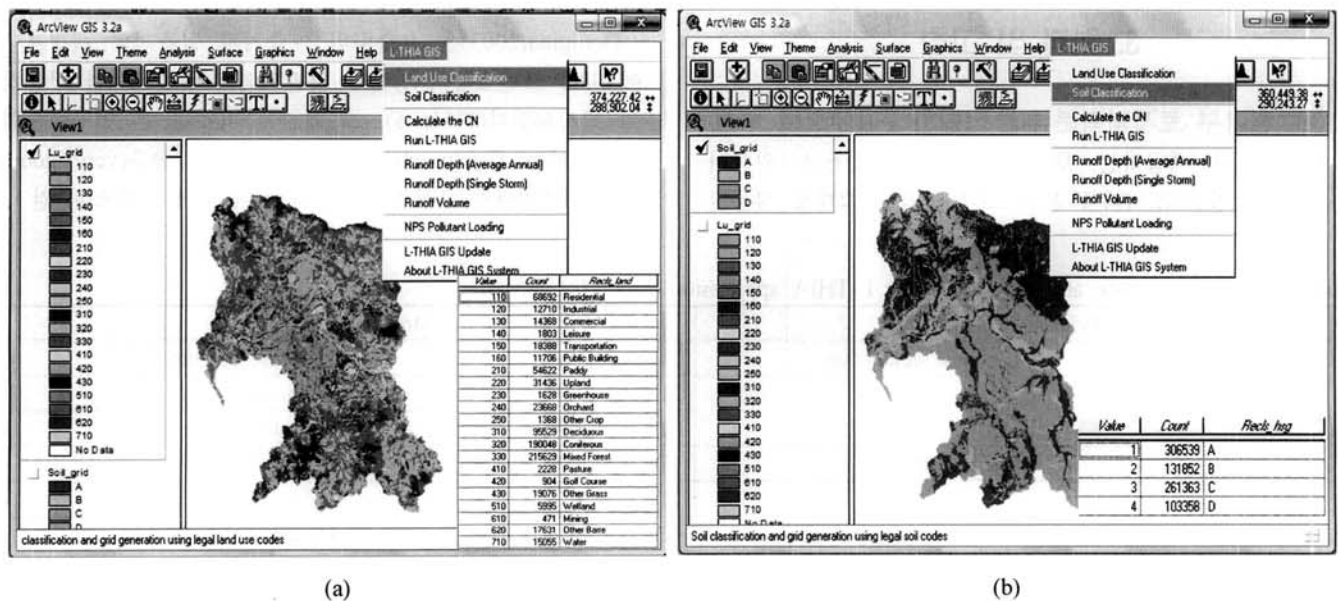


Fig. 6. (a) Land use and (b) soil for L-THIA application.

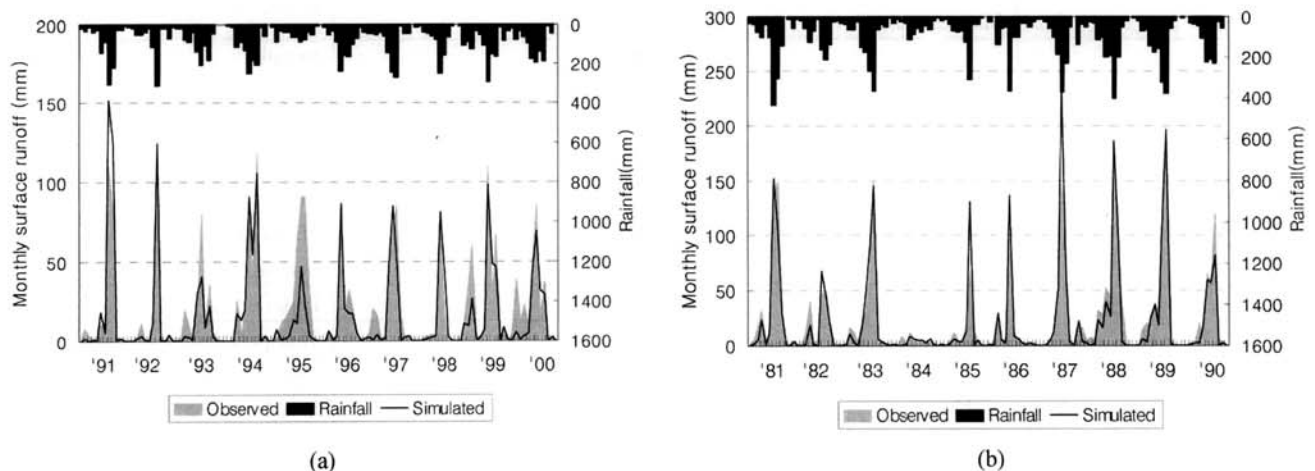


Fig. 7. Calibration (a) and validation (b) results for monthly surface runoff.

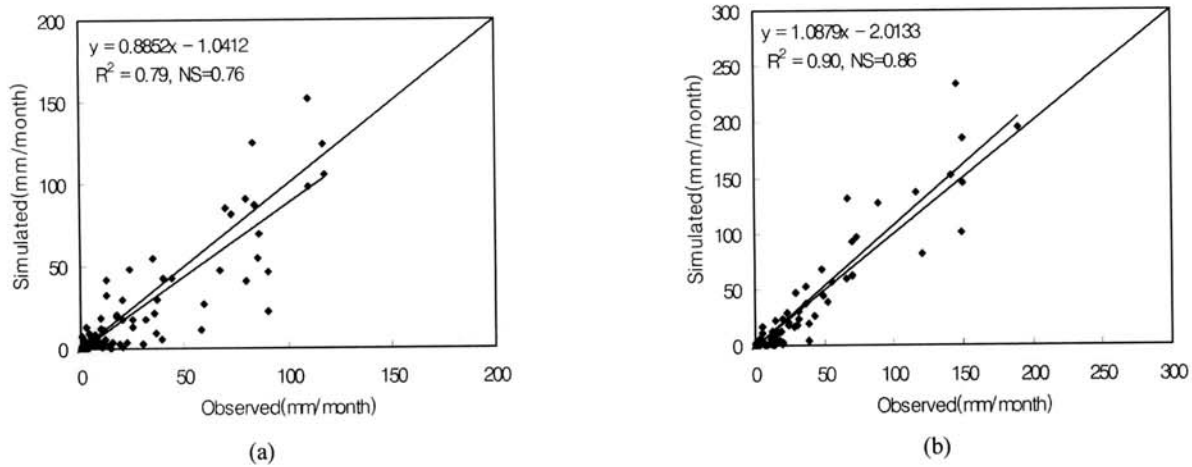


Fig. 8. Scatter plots of calibrated (a) validated (b) monthly surface runoff.

Table 5. Statistical analysis for calibrated and validated monthly surface runoff

	Calibration	Validation
Determine coefficient (R^2)	0.79	0.90
Nash-Sutcliff coefficient (NS)	0.76	0.86

Table 6. 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

Table 7. 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		93	95	96	97
Paddy field		55	86	82	85
Upland		69	83	90	94
Other crops area		69	83	90	93
Deciduous forest		38	60	69	74
Coniferous forest		45	71	82	89
Mixed forest		42	66	76	83
Pasture		53	74	85	90
Open space		49	66	75	79
5-day rainfall (mm)	Dormant season	<33.6		AMC I	
		33.6~40.2		AMC II	
		40.2<		AMC III	
	Growing season	<41.0		AMC I	
		41.0~63.3		AMC II	
		63.3>		AMC III	

보정결과 모두 전반적으로 모델모의정도는 좋음 이상으로 나와 검보정된 CN 인자값들은 금호강 유역을 대표할 수 있는 것으로 나타났다.

SCE-UA기법에 의해 최적화된 CN값은 Table 7과 같다. 도시지역의 CN값은 NRCS에서 추천하는 범위 내에서도 비

교적 높은 값을 나타내어 미국의 도시지역에 비해 불투수층 면적비율이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 또한 논지역과 밭지역의 CN값에도 차이가 있는 것으로 나타났다. 우리나라의 대부분의 토지이용상태를 차지하고 있는 산림지역의 경우에도 활엽수림과 침엽수림, 혼효림은 구분하여 적용하는 것이 유출량 예측에 보다 합리적일 것으로 판단된다.

3.3. 금호강 유역의 유출량 및 비점오염부하 공간적인 분석 결과

L-THIA 모델에 의해 최적화된 CN값을 이용하여 GIS기반의 L-THIA모델의 의해 생성된 CN값과 연평균 유출량에 대한 공간적 분포도와 평균값은 각각 Fig. 9와 Table 8과 같다. 전체 유역에 대한 평균 CN값은 75.57로 나타났으며 평균 CN값보다 높은 값을 나타내고 있는 곳은 금호A, 금호B 유역으로 각각 77.50, 78.85의 값을 나타내었고 가장 높은 곳은 금호B 유역으로 나타났다. 금호C 유역의 경우 평균 CN값보다 낮은 70.36로 조사되었다. 또한 전체 유역의 과거 26년 동안의 연평균 직접 유출량 평균은 192.41 mm로 나타났으며, 금호B 유역에서 가장 높은 직접유출량 (219.24 mm)을 나타내었으며 다음으로 금호A 유역이 180.42 mm의 직접유출량을 나타내었다. 금호C 유역의 경우 직접 유출량이 177.57 mm로 가장 낮은 직접유출량을 나타내었다. 금호A 유역은 산림이 많은 부분을 차지하고 있으며 (Table 1) 하천을 중심으로 하여 높은 CN값 분포하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 9). 금호B 유역은 농경지가 많은 부분을 차지하고 있으며 유역전반에 걸쳐서 배수가 불량한 지역이다(Fig. 3). 따라서, 금호B 유역은 전체에 걸쳐서 높은 CN값과 유출량을 보이고 있다. 금호C 유역은 유역평균 CN값은 상대적으로 낮았으나, 대구광역시 존재하는 유역의 하류에 부분적으로 매우 높은 CN값과 이에 따른 높은 유출고를 나타내었다. 이는 도시화에 따른 불투수층의 증가와 식생피복의 감소로 인하여 상대적으로 직접유출량이 증가한 것으로 판단된다.

Table 9는 단위면적당 비점오염원 부하량을 나타내고 있다. 유기물질에 관련된 BOD의 단위 면적당 비점오염 부하량을 살펴보면 전체유역에서 26.49 kg/ha가 발생하는데 금

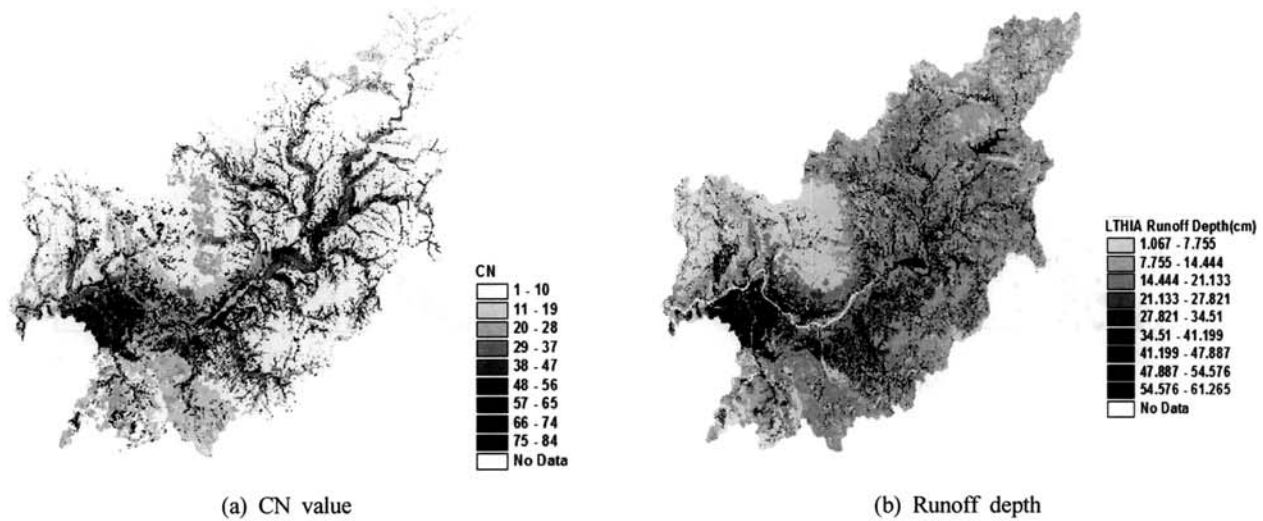


Fig. 9. Spatial distribution of CN value (a) and 26year average yearly surface runoff (b) in Gumho-River Basin.

Table 8. Average CN value and yearly Runoff at Gumho-River Basin

	Average CN	Yearly runoff (mm)	Yearly rainfall (mm)
Gumho A	77.50	180.42	1028.85
Gumho B	78.85	219.24	1083.10
Gumho C	70.36	177.57	1083.10
Total	75.57	192.41	1065.02

호C 유역이 39.68 kg/ha로 가장 높은 부하율을 보이고 있다. 금호B 유역의 경우에는 27.39 kg/ha로써 금호A 유역의 15.80 kg/ha에 비해 단위 면적당 BOD의 비점오염 부하량이 높은 것을 알 수가 있다. SS 단위면적당 부하량을 살펴 보면 전체 유역에서 120.97 kg/ha가 발생하는데 금호B 유역에서 150.80 kg/ha로 가장 많은 부하량을 나타내고, 금호C 유역이 138.86 kg/ha, 금호A 유역이 92.85 kg/ha의 부하량이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 영양물질인 T-N, T-P의 단위 면적당 비점오염부하량을 살펴보면 T-N의 경우 금호C 유역이 7.83 kg/ha로 단위 면적당 비점오염부하량이 가장 높게 나타나며 금호B 유역도 7.06 kg/ha으로 금호A 유역과 비슷한 비점오염부하량을 나타내고 있다. 금호A 유역의 경우 3.74 kg/ha로써 단위 면적당 비점오염부하량은 가장 적었다. T-P의 경우도 단위면적당 총 부하량이 0.85 kg/ha로써 이 중 금호C 유역에서 1.10 kg/ha로 가장 높은 부하량을 나타내고 있고, 금호B 유역이 1.02 kg/ha, 금호A 유역은 0.57 kg/ha로 가장 낮은 부하량을 나타내었다.

Fig. 10은 L-THIA 모델에 의해 예측된 과거 26년 동안의 연평균 비점오염부하량에 대한 공간적인 분포도를 나타내고 있다. 금호강 유역의 BOD 비점오염부하 특성은 도시지역이 밀집되어 있는 금호강 하류유역인 금호 C에서 매우 높은 부하율을 나타내었다. 이에 반해, 토양유실과 관련된 SS의 경우에는 하천의 주변에 발달된 농경지로부터 높은 부하율을 나타내었다. 이는 하천 주변의 농경지로부터의 토양유실이 주된 요인인 것으로 판단된다. 영양물질과 관련된 T-N과 T-P의 경우, 도시유역에서 가장 높은 부하율을 나타

내었으며 하천변 주변에 발달된 농경지 역시 도시유역과 유사한 부하율을 나타내었는데, 이는 농경지에 살포된 비료가 강우시 토양과 함께 유실되기 때문인 것으로 판단된다.

지금까지 유역에서의 비점오염부하량을 예측하기 위하여 SWAT이나 HSPF와 같은 상세모델이 범용적으로 사용되었다. SWAT이나 HSPF와 같은 상세 모델의 적용을 위해서는 일별 혹은 시간별 다양한 기상자료를 수집해야 하며 모델이 요구하는 형태에 맞도록 변환시켜야 한다. DEM과 같은 GIS자료를 이용하여 유역을 구분하고 토지이용도와 토양도를 중첩시켜 소유역별 속성을 추출하는 과정을 거쳐야 한다. 또한 SWAT 모델을 적용하기 위해서는 토양특성에 따른 물리화학적 속성과 기상측정소별 다양한 통계자료를 데이터베이스화 하여 적용시켜야 하기 때문에 SWAT 모델을 우리나라에 적용시키기 위해서는 전처리 과정에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 모델의 검보정에 있어서는 많은 보정인자값을 필요로 하기 때문에 모델사용자는 고도의 전문성을 갖추어야 하며 모델 적용시 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 모델 사용자의 제한이 있었다. 본 연구를 통해 수정보완된 L-THIA은 모델 적용을 위한 전후처리와 검보정에 소요되는 시간과 노력의 최소화를 최대한 유지시키면서, 모델 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있었다. L-THIA모델은 직접유출량과 직접유출에 따른 비점오염부하량을 예측한다. 유출량 예측시 기상자료는 일별 강수량만을 필요로 하기 때문에 기상자료의 획득이 매우 용이하다. 또한 GIS자료는 토지이용도와 토양배수도만을 필요로 하며, 셀별로 모의하기 때문에 별도의 소유역 구분을 필요로 하지 않는다. 직접유출량 모의에 있어서는 최적화 기법인 SCE-UA를 연계적용하고 우리나라에서 환경부의 토지이용 중분류별 실측된 EMC를 적용하기 때문에 직접유출량 및 비점오염부하량 예측에 있어서 신뢰성을 향상시킬 수 있었다. L-THIA모델은 분포형 모델로써, 비점오염부하량의 공간적인 분포를 파악하는데 매우 용이하다. 본 연구의 결과에서 나타난 바와 같이, 수질 항목별 비점오염부하량의 유출특성이 매우 상이한 것을 손쉽게 파악할 수 있었

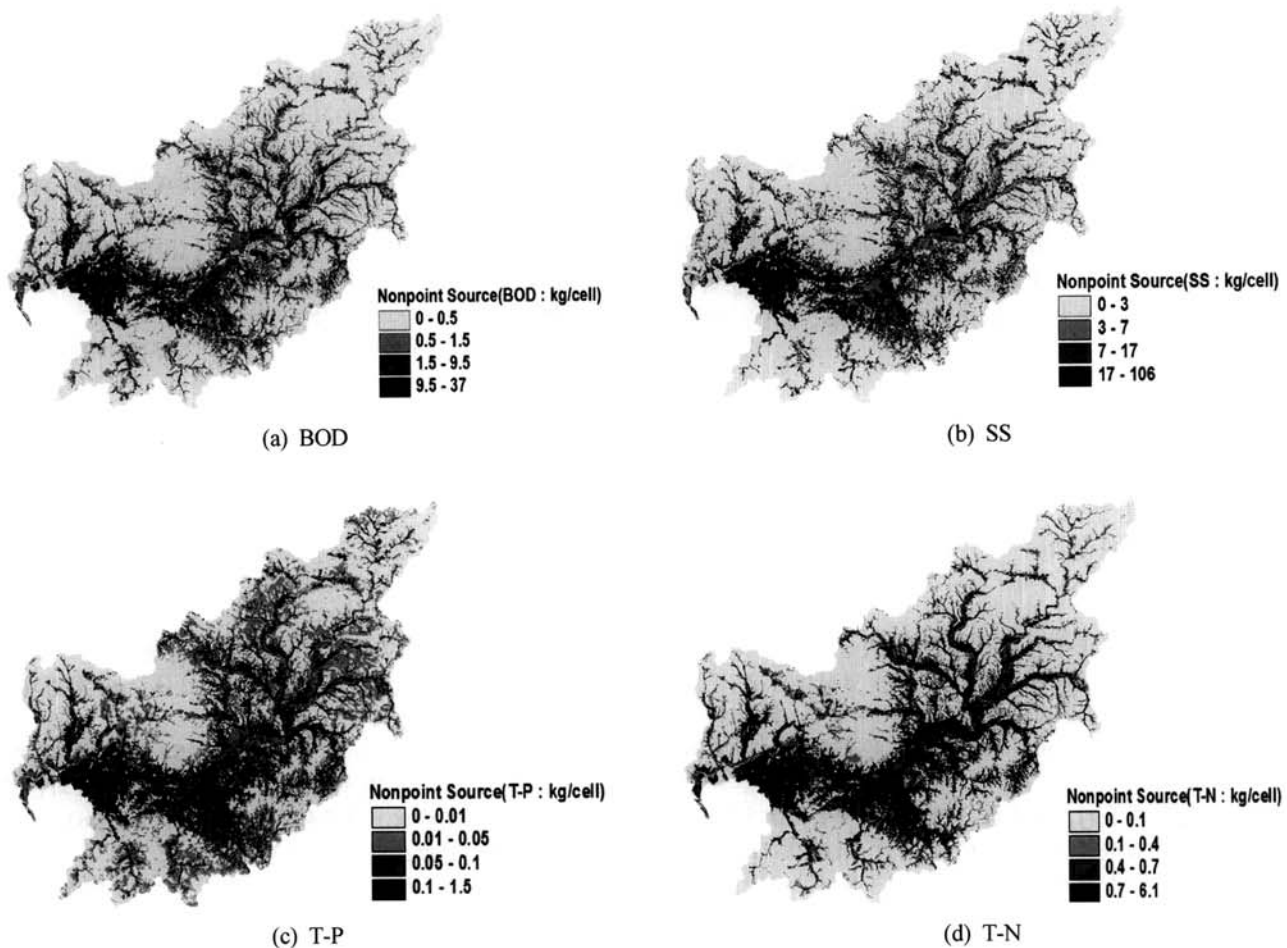


Fig. 10. Satial distribution of nonpoint source pollution at Gumho-River.

Table 9. Nonpoint source load from Gumho-River Basin

	BOD (kg/ha)	SS (kg/ha)	T-N (kg/ha)	T-P (kg/ha)
Gumho A	15.80	92.85	3.74	0.57
Gumho B	27.39	150.80	7.06	1.02
Gumho C	39.68	138.86	7.83	1.10
Total	26.49	120.97	5.85	0.85

다. 현재 수많은 유역모델들이 모델 사용자들에게 제공되고 있으며, 모델사용자는 모델사용의 목적에 적합한 모델을 신중하게 선택하여 적용하여야 한다. 입력자료가 불충분하고 개략적인 공간분석이나 경향분석 파악에는 상세 모델이 적합하지 않으며, 오히려 불확실한 입력자료의 사용으로 인한 모델 결과의 불확실성이 더욱 증가할 수 있다. 또한 L-THIA 모델은 유역내에서의 물수지 및 오염물질 거동파악이나 하천내에서의 거동에는 적합하지 않은 모델이며, 최소의 입력 자료를 이용하여 신속한 오염물질의 공간적인 파악이나, BMP 최적지점선정에 매우 유용한 모델일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 환경부에서 제공하는 토지이용도의 증분류 적용에 적합하도록 L-THIA모델을 수정하였다. 우리나라에서 측정되어 도출된 EMC를 적용하고 SCE-UA최적화 기법에 의해 유출량 검보정을 실시함으로써 직접유출량과 비

점오염부하량 산정에 있어서 신뢰성을 향상시키도록 L-THIA 모델을 개선하여 금호강 유역에 적용성을 평가하였다. 과거 20년 동안의 유출량 자료를 SCE-UA기법과 연계 적용한 결과 모델 보정시(1991~2000년) 모델효율이 0.76이었으며, 모델 검증(1981~1990년)시 모델효율은 0.86으로 SCE-UA기법을 연계적용한 L-THIA모델은 직접유출량 모의시 적용성이 매우 높은 것으로 나타났다. 금호강 유역을 대상으로 한 비점오염부하량의 공간적인 분포를 파악한 결과 BOD와 T-N, T-P의 경우 금호C 유역에서 가장 높은 부하율(39.68 kg-BOD/ha, 7.83kg-TN/ha, 1.10kg-TP/ha)을 나타내었으며 SS의 경우 금호B 유역에서 가장 높은 부하율(150.80 kg-SS/ha)을 나타내었으며 T-N과 T-P는 도시유역과 거의 유사한 양의 부하율(7.06 kg-TN/ha, 1.02 kg-TP/ha)을 나타내었다. 산림유역인 금호 A유역에서 발생하는 비점오염원의 유출량은 가장 낮은 단위면적당 부하량을 나타내었다. BOD와 TN, TP 부하의 경우 도시지역을 중심으로 부하율이 높은 반면 SS는 하천주변의 농경지에서 높은 부하율을 나타내어 비점

오염원에 따라서 유출부하특성이 다르게 나타났다. 수질 관리에 있어서 비점오염의 중요성이 점점 증대되고 있으며, 비점오염부하량의 저감을 위한 다양한 BMP기법이 시범사업을 중심으로 진행되고 있다. 그러나 유역에서의 효율적인 비점관리를 위해서는 조절하고자 하는 수질항목별 부하의 공간적인 분석이 선행 되어야할 것으로 판단된다. 본 연구에서 수정된 L-THIA 모델은 사용이 비교적 간단하면서도 신뢰성이 개선됨으로써, 비점오염부하량의 공간적인 분석과 장치형 BMP의 위치설정 등에 적용성이 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 장덕호, 김태원, 김영도, 권재현(2007). SWAT 모형을 이용한 조만강 유역의 오염부하량 산정. 2007 공동 추계 학술 발표회 논문집, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회, pp. 522-526.
- 김동성(2006). GIS와 L-THIA를 이용한 비점오염원 배출부하량 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 영남대학교.
- 김만식, 정승권(2000). 지리정보시스템을 이용한 유역의 토지이용별 비점오염부하량 분석. *환경관리학회지*, 6(3), pp. 411-421.
- 김종건, 임경재, 박윤식, 허성구, 박준호, 안재훈, 김기성, 최중대(2007a). 경사도에 따른 CN보정에 의한 L-THIA 직접유출 모의 영향 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 23(6), pp. 897-995.
- 김종건, 박윤식, 전지홍, Engel, B. A., 안재훈, 박영곤, 김기성, 최중대, 임경재(2007b). 선행토양함수조건(AMC)을 고려한 L-THIA WWW 직접유출 모의 정확성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 23(4), pp. 474-481.
- 낙동강수계관리위원회(2007). 주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법 연구: 1년차 보고서. 국립환경과학원 낙동강물환경연구소.
- 낙동강환경관리청(2001). 낙동강유역 환경지도: 물관리 부문 중심으로. 낙동강환경관리청.
- 대구지방환경청(2007). 금호강 중권역 물환경 관리계획.
- 박경훈, 오정학, 정성관(2005). 금호강 유역관리를 위한 수변구역의 토지이용패턴분석. *한국지리정보학회지*, 8(2), pp. 157-165.
- 박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재(2007). 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 23(4), pp. 467-473.
- 박윤희, 김태근(2006). AnnAGNPS 모형을 이용한 수변구역의 비점오염물질 제거능 산정. *한국환경복원녹화학회지*, 9(5), pp. 22-31.
- 신아현(2008). BASINS/WinHSPF를 이용한 충주댐 유역의 댐 모의 및 비점오염 저감방안 연구. 석사학위논문. 건국대학교.
- 신창민, 최지용, 박철휘(2004). 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성. *대한환경공학학회지*, 27(7), pp. 729-735.
- 심창석(2004). AGNPS 모델에 의한 비점오염원으로부터 하천으로 유입되는 오염부하량 예측. *한국수처리학회지*, 12(1), pp. 39-50.
- 영산강 · 섬진강수계관리위원회(2007). 논으로부터 배출되는 오염부하 특성조사 및 오염부하 산정범용식 개발 : 3년차 최종보고서.
- 윤춘경, 한정원, 정광욱, 장재호(2007). 소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 위한 BASINS/WinHSPF 적용. *한국육수학회지*, 40(2), pp. 201-213.
- 이현동, 배철호(2002). 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안. *수질보전 한국물환경학회지*, 18(6), pp. 569-576.
- 임경재, Engel, B. A., 김영석, 최중대, 김기성(2003). 도시화에 따른 유출과 비점원 오염 영향을 평가하기 위한 L-THIA/NPS. *한국농공학회지*, 45(4), pp. 78-88.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 전지홍(2006). BASINS/HSPF를 이용한 용담댐유역의 오염부하량 산정. *한국육수학회지*, 29(2), pp. 187-197.
- 전민우, 조용수, 김 훈(2006). AnnAGNPS 모형을 이용한 유역의 비점오염원 및 수질 모의, *건설기술논문집*, 25(1), pp. 119-130.
- 전지홍, 최동혁, 김정진, 김태동 (2009). SCE-UA 최적화기법에 의한 낙동강 유역의 CN값 도출. *수질보전 한국물환경학회지*, 25(2), pp. 245-255.
- 한강수계관리위원회(2007). 주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법 연구: 1년차 보고서. 국립환경과학원 한강물환경연구소.
- 한건언, 박경욱, 정재호, 김동일(2006). SWAT를 이용한 댐 유역의 비점오염 분석. 2006 공동 추계 학술발표회논문집, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회, pp. 656-663.
- 환경부(1995). *비점오염원 조사연구사업 보고서*.
- 환경부(2003). *4대강 유역 비점 오염원 관리 종합대책 수립*.
- 황하선(2007). 우리나라 수질오염총량관리제에 있어 유역특성을 고려한 BASINS/WinHSPF의 적용성 연구-낙동강 수계를 중심으로. 박사학위논문, 건국대학교.
- Baird, C. and Jennings, M. (1996). *Characterization of nonpoint source and loadings to the Corpus Christi Bay national estuary program study area*. Texas National Resource Conservation Commission.
- Bhaduri, B., Harbor, J., Engel, B. A., and Grove, M. (2000). Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land use change using a GIS-NPS model. *Environmental Management*, 26(6), pp. 643-658.
- Choi, J. Y., Engel, B. A., and Harbor, J. (2002). GIS and Web-based DSS for Preliminary TMDL Development. *Total Maximum Daily Load (TMDL) Regulation: Proceedings of the March 11-13, 2002 Conference*, Fort Worth, Texas, USA. pp. 477-484.
- Choi, J. Y., Engel, B. A., Muthukrishnan, S., and Harbor, J. (2003). GIS Based Long Term Hydrologic Impact Evaluation from Watershed Urbanization. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), pp. 623-635.
- Donigian, A. S. and Love, J. T. (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.
- Engel, B. A. (2005). *L-THIA NPS version-2.3*.
- Grove, M., Harbor, J., Engel, B. A., and Muthukrishnan, S. (2001). Impacts of Urbanization on Surface Hydrology. Little Engle Creek, Indiana, and Analysis of L-THIA Model Sensitivity to Data Resolution. *Physical Geography*, 22, pp. 135-153.
- Kim, Y., Engel, B. A., Lim, K. J., Larson, V., and Duncan,

- B. (2002). Runoff Impacts of land-use change in Indiana river lagoon watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(3), pp. 245-251.
- US EPA (1997). *Compendium of Tools for Watershed Assessment and TMDL Development*.
- US EPA (2001). *PLOAD version 3.0: User's Manual*.
- International Erosion Control Association (2002). *Stormwater Quality Specialist Review*.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H., and Jung, K. W. (2006). Evaluation of BASINS/WinHSPF applicability for pollutant loading estimation for a Korean watershed. *Water Science and Technology*, 53(1), pp. 25-32
- Jung, K. W. (2007). Development of 3D Intergrated Water Quality Siltmulation System by Applying Basins/WinHSPF And EFDC in Han River Basin and Paldang Reservoir. Ph.D. Dissertation, Konkuk Unviersity, Korea.
- Lim, K. J., Engel, B. A., Kim, Y., Bhaduri, B., and Harbor, J. (1999). Development of the long term hydrologic impact assessment (l-THIA) WWW system. Paper No. 992009, *Amer. Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI. 1999.
- Lim, K. J., Engel, B. A., Tang, Z., Muthukrishnan, S., Choi, J., and Kim, K. (2006). Effects of calibration on L-THIA GIS runoff and pollutant estimation. *Journal of Environmental Management*, 73, pp. 35-43.
- Tang, Z., Engel, B. A., Lim, K. J., and Pijanowski, B. C. (2005a). Minimizing the impact of urbanization on long term runoff. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), pp. 1347-1359.
- Tang, Z., Engel, B. A., Pijanowski, B. C., and Lim, K. J. (2005b). Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 76(1), pp. 35-45.