최적화 기법을 이용한 임하호유역 대표 CN값 추정

Regionalization of CN values at Imha Watershed with SCE-UA

전지홍* · 김태동* · 최동혁*†

Jeon, Ji-Hong · Kim, Taedong · Choi, Donghyuk

ABSTRACT

Curve Numbers (CN) for the combination of land use and hydrologic soil group were regionalized at Imha Watershed using Long-term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) coupled with SCE-UA. The L-THIA was calibrated during 1991-2000 and validated during 2001-2007 using monthly observed direct runoff data. The Nash-Sutcliffe (NS) coefficients for calibration and validation were 0.91 and 0.93, respectively, and showed high model efficiency. Based on the criteria of model calibration, both calibration and validation represented 'very good' fit with observe data. The spatial distribution of direct surface runoff by L-THIA represented runoff from Thiessen poligon at Subi and Sukbo rain gage station much higher than other area due to the combination of poor hydrologic condition (hydrologic soil C and D group) and locality heavy rainfall. As a results of hydrologic condition and treatment for land use type based on calibrated CNs, forest is recommended to be hydrologically modelled dived into deciduous, coniferous, and mixed forest due to the hydrological difference. The CNs for forest and upland showed the poor hydrologic condition. The steep slope of forest and alpine agricultural field make high runoff rate which is the poor hydrologic condition because CN method can not consider field slope. L-THIA linded with SCE-UA could generated a regionalized CNs for land use type with minimized time and effort, and maximized model's accuracy.

Keywords: Curve number; global optimization; Imha Watershed; L-THIA; regionalization; SCE-UA

I. 서 론

유출곡선식(Curve Number equation; CN equation)은 미농림부에서 연간 직접유출량을 계산하기 위해서 개발된 공식으로 토지피복상태와 토양배수상태를 고려하여 비교적 사용이 간단하다. GIS와 컴퓨터의 발달로 인하여 토지피복과 토양배수에 대한 정보를 GIS 파일로 간단하게 취득할 수 있고 유출곡선식의 직접 유출량 예측이 비교적 정확하기 때문에 최근에는 다양한 수문모델의 유출량 예측에 이용되고 있다. 미농림부에서는 토지이용별 그리고 토양배수등급별 CN값을 제시하고 있으나 동일한 토지이용과 토양배수등급이라도 토양피복상태나 경작방법, 불투수층면적비율에 따라 CN의 변동이 크기 때문에 모델사용자들은 CN값의 선택에 주의를 요할 필요가 있다 (Jeon et al., 2007). Kim et al. (2007a)은 CN기법을 우리나라에 적용시 선행함수조건에

따른 CN I, CN III 계산식의 시행착오법으로 수정함으로써 직접 유출량의 예측결과를 개선시켰다. Kim et al. (2007b)은 CN기법에 의한 유출량 모의시 경사도에 따른 CN 보정식을 적용하여 예측결과를 개선시켰다. Kim et al. (2009)는 미농림부에서 제시한 토지이용별 그리고 토양배수등급별 CN범위내에서 SCE-UA 최적화기법을 적용하여 CN값을 자동으로 보정함으로써 CN에 의한 유출량 모의결과를 크게 개선시킴으로써, CN적용시 보정의 필요성을 강조하였다.

Long-term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA)는 유출곡선식과 유량가중평균농도(Event mean concentrations; EMCs)에 의해 직접유출량과 비점오염부하량을 산정하는 비교적 사용이 간단한 모델이다 (Lim et al., 2001). Kim et al. (2009)은 미국에서 개발된 L-THIA 모델을 우리나라 환경부 토지피복 중분류를 그대로 사용할 수 있도록 수정함으로써 별도로 토지피복을 재분류할 필요가 없으며 논을 모의할 수 있도록 함으로써 우리나라 유역에 있어 L-THIA모델의 적용성을 향상시켰다. L-THIA 모델은 최근들어 우리나라에도 수문분석과 비점오염분석에 있어 소유역에서부터 대유역에 이르기까지 그 사용빈도가 증가하고 있다. Shin et al. (2010)은 금강수계에 위치한 대청호상

* 안동대학교 환경공학과

† Corresponding author Tel.: +54-820-6160

Fax: +54-820-6187

E-mail: cdh@andong.ac.kr

2011년 7월 28일 투고

2011년 8월 18일 심사완료

2011년 9월 7일 게재확정

류 유역을 대상으로, Kim et al. (2009)는 낙동강 수계에 위치한 금호강유역을 대상으로, Yoon et al. (2006)은 한강수계에 위치한 중랑천유역을 대상으로 공간적인 비점오염원 분포를 파악하는데 L-THIA 모델을 사용하였다. Kim et al. (2010)은 도암댐 유역을 대상으로 SWAT과 L-THIA 모형간 직접유출량을 비교분석한 바 있다. Jeon et al. (2010)은 전국에 위치한 48개 농업용 저수지 유역을 대상으로, Kim (2006)은 낙동강 수계를 대상으로 L-THIA 모델을 적용하여 비점오염부하량의 공간적인 분포를 분석한 바 있다. 최근 L-THIA 관련 연구에서는 전역적 최적화 기법인 SCE-UA와 연계시켜 모델예측의 정확성을 향상시키는데 초점을 맞추고 있다. Kim et al. (2009)이 SCE-UA와 연계시켜 금호강 유역의 유출량을 자동보정하였으며, Jeon and Engel (2011)은 미국의 인디애나주에 위치한 16개의 유역을 대상으로 미계측유역의 유출량 예측을 위하여 SCE-UA를 연계시켜 지역을 대표하는 CN값 보정방법에 대하여 평가한 바 있다.

낙동강 최상류에 위치한 임하댐은 낙동강 하류의 중요한 수원으로 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미의 여파로 고탁수 문제가 큰 수질문제로 대두되었다. 2007년에 들어서는 소양호, 도암호, 광주광역시와 함께 수질환경보전법 제54조에 의거하여 우리나라에서는 최초로 비점오염관리지역으로 지정되었다. 이후 임하댐유역은 비점오염원 관련 중요한 연구대상이 되었으며 지속적으로 많은 연구자들에 의해 비점오염원과 관련된 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 L-THIA와 SCE-UA를 연계·적용하여 과거 17년(1991~2007)동안의 월별 직접유출량에 대하여 검·보정을 수행하고 임하호 유역에 대한 토지이용별 그리고 토양배수등급별 대표 CN값을 도출함으로써, 임하호유역의 직접유출특성을 파악하고 임하호유역을 대상으로하는 CN관련 모델 연구자들에게 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. L-THIA 개요

L-THIA는 미국의 퍼듀대학교에서 개발한 분포형 모델로써 CN 기법에 의해 직접유출량을 계산한 후 EMCs를 곱하여 비점오염부하량을 계산한다. L-THIA는 5일-선행함수조건(Antecedent moisture condition; AMC)을 고려하여 건기조건인 AMC I, 포화조건인 AMC III, 평균조건인 AMC II를 구분하여 CN값을 조정한다. CN II값을 이용하여 식(1)에 의해 AMC I 조건의 CN I과 AMC III 조건의 CN III의 값을 구하며 식물성장기(growing season)와 비성장기(dormant season)를 구분하여 5일 선행강우량에 따라 AMC 조건을 결정한다 (Table 1).

$$CNI = \frac{4.2CNII}{10 - 0.058CNII} \quad \text{식 (1)}$$

$$CNIII = \frac{23CNII}{10 + 0.13CNII}$$

Table 1 Classification of AMC for CN method

AMC	Total 5-day antecedent rainfall (mm)	
	Growing season	Dormant season
I	< 35.56	< 12.70
II	35.56 ~ 53.34	12.70 ~ 27.94
III	> 53.34	> 27.94

일별 유출량은 식 (2)~(3)에 의해 계산되어 진다 (NRCS, 1985).

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, P \geq 0.2S \quad \text{식 (2)}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{식 (3)}$$

여기서, P_e 는 직접유출량, P 는 강우량, S 는 최대잠재보유수량, CN 은 유출곡선이다. CN 값은 토지이용도와 토양배수등급, EMCs는 토지이용도에 따라 결정되어 지며, ArcView GIS를 이용한 L-THIA 적용개요도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1 Overview of the L-THIA GIS system (Lim et al., 2001)

2. SCE-UA 개요

SCE-UA기법은 미국 애리조나주립대 (University of Arizona)에서 controlled random search (Nelder and Mead, 1965), competitive evolution (Holland, 1975), new complex shuffling

Fig. 2 Flow Chart of SCE-UA algorithm (Duan et al., 1992)

concept (Duan et al., 1992)를 단순화하여 개발한 전역적 최적화기법으로 모델의 최적화 (자동보정)에 있어 전역적 최적화 기법인 유전자알고리즘 (Genetic Algorithm)보다 좋은 결과를 제공한다고 보고되고 있다 (Kuczera, 1997). SCE-UA 흐름도는 Fig. 2와 같다.

SCE-UA에서는 여러 개의 콤플렉스라는 공간에 난수들 (포인트, m)이 할당되는데, 콤플렉스 샘플 (s)의 크기, 즉 각 보정인자에 대하여 생성되는 난수의 총 개수는 콤플렉스의 개수 (p)와 포인트의 개수 (m)을 곱하여 결정된다. 보정하고자 하는 인자에 샘플 (s)를 입력한 후 모델을 실행시켜 목적함수를 계산하고 순위를 결정하여 개체 s를 m개를 가지는 p개의 콤플렉스에 할당한다. 각각의 콤플렉스는 경쟁진화 알고리즘에 의해 진화되며 이 과정동안 얻은 진화된 세대는 새로운 콤플렉스를 형성하여 최적해로 수렴한다. SCE-UA에 관한 보다 자세한 내용은 Duan et al. (1992)의 논문을 참조하기 바란다.

3. 연구대상지역

연구대상지역인 임하댐은 경상북도 안동시 임동면 망천리와 임하리 사이에 위치한 다목적댐으로 높이 73 m, 길이 515 m이며 총저수량은 5억 9천만 톤의 록필식 사력댐이다. 유역면적은 1,461 km²이고 유역평균경사는 40.26 %, 유로연장이 112.75 km인 국내의 다목적댐 중 6번째로 크다 (Fig. 3).

4. 입력자료 및 연구방법

L-THIA 모델은 토지이용도와 토양배수등급도를 필요로 한다. 토지이용도는 환경부에서 제공하는 2007년 기준의 중분류 토지 피복도를 30×30 m 격자크기의 그리드파일로 변환하였다. 토양

Fig. 3 Study area

Table 2 The range of CN parameter for CN calibration (Kim et al., 2009)

Land use		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.

배수등급도는 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도의 배수 등급을 수치화하여 30×30m 격자크기의 그리드파일로 변환하였

Fig. 4 GIS data for L-THIA application

다. 본 연구에서는 임하호내 8개의 강수량 관측지점을 포함하고 있기 때문에 공간적인 강우특성을 반영하기 위하여 8개 지점의 측정소를 이용하여 티센망을 생성한 후 30×30 m 격자크기의 그리드파일로 변환하였다. 임하호유역의 유출량 자료는 수자원 공사 홈페이지 (www.kwater.or.kr)의 일별 댐 유입량 자료를 활용하였으며, 8개 지점별 일별 강수량은 국가수자원관리종합정보시스템 (www.wamis.go.kr)의 자료를 활용하였다. 임하호 유역에 대한 토지이용도와 토양배수등급도, 티센망도는 Fig. 4와 같다. 토지이용도와 토양배수등급도를 중첩시켜 각 셀별 CN값을 할당하는데, SCE-UA에 의한 유출량 자동보정시 CN값은 미농림부에서 토지피복 및 경작상태, 불투수층면적등에 따라 추천된 각 토지이용별 그리고 토양배수등급별 CN값 범위내에서 선택하였다 (Table 2).

III. 결과 및 고찰

1. 유출량 검·보정결과

임하호유역을 대상으로 1991~2007년까지 월별 지표유출량에 대한 모델의 보정 (1991~2000) 및 검정 (2001~2007)에 대한 결과는 Table 3과 Fig. 5와 같다. 보정결과 예측치와 실측치의 결정계수 (R^2)와 Nash-Sutcliffe (NS) 값은 각각 0.90, 0.91이었으며 검정결과는 각각 0.93, 0.93인 것으로 나타났다. Donigian (2003)은 유출량 예측치에 대한 모델 검·보정결과의 정확성을 일별, 월별로 구분하여 결정계수의 범위로 매우 좋음 (Very good),

Table 3 L-THIA model performance for monthly simulation at Imha watershed

	Calibration	Validation
R^2	0.90	0.93
NS	0.91	0.93

Table 4 Determine coefficient 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

좋음 (Good), 보통 (Fair), 나쁨 (Poor)로 구분하였는데 (Table 4), Donigian의 기준에 따르면 본 연구의 보정 및 검정 모두 결정계수가 0.85 이상으로 분석되어 매우 좋음 (Very good)으로 나타났다.

L-THIA 모델에 의한 월별 예측치와 실측치에 대한 1:1 분산도는 Fig. 6과 같다. 점선은 1:1선이며, 실선은 1차 회귀선을 나타내고 있다. 대부분의 점들이 1:1선에 밀집되어 있고 1차 회귀선의 경우 상관관계가 높고 1:1선과 거의 중첩되는 것으로 나타나 1:1 분산도에서도 예측치가 실측치를 잘 따르는 것으로 나타났다.

2. 임하호 유역 직접유출량 공간적 분포분석

2002년 (태풍 루사)과 2003년 (태풍 매미)에 대한 연간 직접

Fig. 5 Calibration and validation results for monthly runoff simulation by L-THIA

Fig. 6 Scatter plots between monthly simulated and observed runoff by L-THIA

유출량의 공간적 분포도는 Fig. 7과 같다. 태풍 루사는 태풍 매미에 비해 높은 유출고를 나타내었다. 또한 2002년과 2003년 모두 Fig. 4의 토양배수등급과 비교해 볼 때 상대적으로 유출이 높은 지역은 토양배수상태가 불량한 (C, D 등급)지역인 것으로 나타났다 (Fig. 6). 이중에서도 티센망도를 고려해 볼 때, 2002년도에는 수비, 석보, 부동 측정소의 영향권이, 2003년도에는 일월, 수비, 석보 측정소의 영향권이 높은 유출고를 나타내었으며 일월영향권을 제외하면 모두 강한 국지성 호우에 의한 것으로 나타났다 (Table 5). 일월 영향권의 경우 토양배수 C와 D등급에 의한 것으로 나타났다. 따라서, 고탁수에 의한 심각한 수질 문제를 야기시킨 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미 년도의 유출특성은 토양배수등급과 지역별 강우량에 의해 유출량에 차이를 보이는 것으로 나타났으며 배수가 불량한 지역에 국지성 강한 호우가 내려 유출에 크게 영향을 미친 것으로 나타났다.

Table 5 Yearly and daily maximum precipitation for 2002 and 2003

Weather station	Yearly precipitation (mm/yr)		Daily maximum precipitation (mm/day)	
	2002	2003	2002	2003
Ilwoul	1,422	1,640	156	148
Subi	1,578	1,557	267	183
Youngyang	1,319	1,350	143	110
Sukbo	1,522	1,674	247	227
Jinbo	1,327	1,541	136	142
Cheongsong	1,314	1,503	114	124
Budong	1,580	1,541	317	142
Bunam	1,316	1,649	186	175

Fig. 7 Spatial distribution of surface runoff at Imha Watershed for 2002 and 2003

3. 임하호 유역 대표 CN값 도출 및 토지피복특성 고찰

본 연구를 통해서 도출된 임하호 유역의 토지이용별 그리고 토양배수등급별 CN값은 Table 6과 같다. 논과 밭의 CN값에도 차이가 있는 것으로 나타나 우리나라에서 모델을 이용한 유출량 예측시 논과 밭을 구분해서 적용해야 보다 현실성있는 예측이 가능하리라 판단된다. 일반적으로 모델이용자들은 산림의 특성을 고려하지 않고 하나의 토지이용상태로 묶어서 모의하는 경향이 있으나 본 연구에서는 침엽수림과 활엽수림간의 CN값의 차이가 10 이상이 나는 경우도 있었으며 이러한 차이는 배수상태가 나뉠수록 큰 것으로 나타났다. 우리나라 토지이용의 대부분이 산림임을 고려해 볼 때 유역에서의 유출량 예측시 산림을 하나의 카테고리로 묶지 않고, 침엽수림과 활엽수림, 혼효림으로 구분하여 모델을 예측하는 것이 보다 신뢰성 있는 유출해석이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출된 CN값과 미농림부에서 토지피복상태에 따른 추천 CN값을 이용하여 임하호유역의 토지피복과 배수상태, 경작상태, 도시지역의 불투수층비율을 역추정한 결과는 Table 7과 같다. 주거지역과 기타 도시지역의 불투수층 면적비율은 각각 69 %, 73 %로 미국에 비해 불투수층 면적비율이 높게 나타났

Table 6 Regionalized CN parameter by L-THIA at Imha Watershed

Land use	Hydrologic soil group			
	A	B	C	D
Residential area	79	86	90	92
Other urban area	82	88	91	93
Paddy field	69	78	86	89
Upland	68	82	90	93
Other crops area	68	82	90	93
Deciduous forest	39	62	71	76
Coniferous forest	45	71	82	89
Mixed forest	43	68	78	85
Pasture	53	74	85	90
Open space	52	71	81	85

다. 그러나 임하호 유역의 도시지역 면적이 매우 낮음을 고려할 때 추가적인 연구가 필요로 하나 도시지역의 면적비율이 높은 유역에 있어서는 미국에서 추천하는 CN값을 그대로 사용할 경우 유출량예측에서 큰 오차를 발생시킬 수 있으므로 CN값 선택 시 세심한 주의가 요구된다. 논·밭의 경우 미농림부에서 추천하는 밭의 토지피복과 직접적으로 비교하기는 어려우나 Park (1997)

Table 7 Cover type, treatment, and hydrologic condition for land use at Imha Watershed

Land use	Hydrologic characteristics
Residential area	Average percent impervious area is 69 %
Other urban area	Average percent impervious area is 73 %
Paddy field	Row crops with contoured treatment and poor hydrologic condition
Upland	Row crops with straight row treatment and poor hydrologic condition
Other crops area	Row crops with straight row treatment and poor hydrologic condition
Deciduous forest	Woods with fair hydrologic condition
Coniferous forest	Woods with poor hydrologic condition
Mixed forest	Woods with poor hydrologic condition
Pasture	Pasture, grassland, or range-continuous forage for grazing with fair hydrologic condition
Open space	Open space with fair condition (grass cover 50 % to 75 %)

에 의한 연구결과에 따르면 강우 사상별 논에서의 CN값은 68 ~ 93의 범위를 나타내었으며, 논외의 물수지모형으로부터 순별 CN 값의 범위는 72 ~ 84, 논평균 CN값은 79인 것으로 나타나 본 연구에서 도출된 값의 범위내에 있는 것으로 나타났다. 밭과 기타농경지는 배수가 불량한 상하경에서의 유출특성을 가지고 있는 것으로 나타나 비교적 유출률이 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 침엽수림과 혼효림은 배수가 불량한 산림유역의 유출특성과 유사하게 나타났으며, 활엽수림은 배수가 적당한 산림 유역의 유출특성을 나타내었다. 초지는 배수가 적절한 초지의 유출특성과 가장 유사하였다. 나지의 경우에는 전체면적의 50 ~ 75 %가 잔디에 의해 식재된 배수가 적절한 나지의 유출특성과 가장 유사하게 나타났다.

임하호 유역의 토지이용별 그리고 토양배수등급별 유출특성과 고탁수문제를 유발한 2002년과 2003년도 유출량에 대한 공간적인 분포를 고찰한 결과 반변천 유역의 경우 배수가 비교적 불량한 C, D 등급을 대부분 포함하고 있어 높은 유출량을 나타내었으며 수비, 석보 측정소 영향권에 국지성 강우에 의한 높은 유출량을 나타내었다. 또한 고탁수를 유발시키는 밭지역은 높은 유출률을 나타내었다. 이는 미농림부에서 추천하는 CN값은 다양한 유역의 경사도를 포함하지 못함을 감안할 때 밭지역의 높은 유출률은 경사도가 급한 고랭지밭의 유출특성을 반영한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

임하호유역을 대상으로 과거 17년 (1991~2007)동안의 월별 직접유출량을 L-THIA모델과 SCE-UA 최적화 기법을 연계적용

하여 임하호 유역의 토지이용별 그리고 토양배수등급별 대표 CN 값을 도출하고 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. L-THIA와 SCE-UA를 연계적용하여 월별 직접유출량에 대한 보정 (1991~2000)과 검정 (2001~2007)결과 Nash-Sutcliffe값은 각각 0.91과 0.93으로 나타나 높은 모델효율을 나타내었다.

2. L-THIA 모델을 이용한 임하호 유역의 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미 연도에 대한 유출량 공간적 분석결과, 배수등급이 불량한 반변천 유역에 높은 유출률을 나타내었으며, 반변천 유역내에서도 국지성 호우가 강한 수비와 석보 강우측정소 영향권에 높은 유출률을 나타내었다.

3. 논과 밭의 유출특성에는 뚜렷한 차이를 나타내었으며, 밭과 기타 농경지는 유출특성이 유사한 것으로 나타났다. 산림지역의 경우 활엽수는 침엽수와 혼효림과는 유출특성에 뚜렷한 차이점을 나타내어 산림지역이 우세한 우리나라의 경우에는 산림지역을 활엽수와 침엽수, 혼효림을 구분하여 수문모형을 적용하는 것이 보다 신뢰성 있는 모의결과를 기대할 수 있다.

4. 임하호 유역내 농경지의 경우 동일한 토지이용상태와 배수등급임에도 불구하고 토양의 피복상태 혹은 경작상태가 비교적 유출이 쉽게 일어나는 특성을 나타내었는데 이는 임하호 내 고랭지밭의 높은 경사도를 반영한 것으로 판단된다. 유역말단에 고탁수의 문제를 유발시키는 임하호가 위치해 있다는 것을 고려했을 때 이러한 유출특성은 탁수문제에 있어서는 불리할 것으로 판단된다.

5. 최소의 입력자료로 비교적 사용이 간단한 L-THIA 모델을 SCE-UA와 연계적용시켜 직접유출량 예측에 신뢰성을 높임으로써 적용성을 향상시킬 수 있었다. L-THIA 모델은 스크리닝 단계의 모델로써 충분히 적용 가능할 것으로 판단되며, SWAT과 AGNPS모델과 같은 CN기반의 상세모델의 기초입력자료를 제공함으로써 유출량 보정과정에서 시간과 노력 단축과 모델예측의 신뢰성 확보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문은 2009학년도 안동대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Donigan, Jr.A.S., 2002. Watershed model calibration and validation: The HSPF Experience. *WEF Speciality Conference Proceedings*, Phoenix, AZ. WEF National TMDL Science and Policy 2002.
2. Duan, Q., S. Sorooshian, and V.K. Gupta, 1992. Effective

- and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resource Research* 28(4): 1015-1031.
3. Holland, J.H., 1975. Adaptation in natural and artificial systems, Univ. of Mich. Press, Ann Arbor, MI.
4. Jeon, J.H., and B.A. Engel, 2011. Regional calibration of SCS-CN runoff model: Application for ungauged basin. *Environmental Modelling & Software* (submitted).
5. Jeon, J.H., B.A. Engel, K.J. Lim, and C.G. Yoon, 2007. Effect of land use type and hydrologic soil group on SCS-CN uncertainty using Monte Carlo simulation. *7th International IWA Symposium on Systems Analysis and Integrated Assessment in Water Management*, 7-9 May, 2007, Washington DC. USA.
6. Jeon, N.J., C.G. Yoon, S.B. Lee, and Y.K. Son, 2010. Feasibility study of water quality prediction for agricultural reservoir using L-THIA Arcview GIS. *2010 Spring Conference Proceeding of Korean Society on Water Quality*, 51-52.
7. 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)
8. Kim, J.G. Y.S. Park, J.H. Jeon, B.A. Engel, J.H. Ahn, Y.K. Park, K.S. Kim, J.D. Choi, and K.J. Lim, 2007a. Evaluation of L-THIA WWW direct runoff estimation with AMC adjustment. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(4): 474-481.
9. Kim, J., K.J. Lim, Y. Park, S. Heo, J. Park, J. Ahn, K.S. Kim, and J. Choi, 2007b. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Kuczera, G., 1997. Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models. *Water Resources Research* 33(1):177-185.
13. Lim, K.J., B.A. Engel, Y. Kim, B. Bhaduri, and J. Harbor, 2001. Development of Long-term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) WWW System. International Soil Conservation Organization in cooperation with the USDA and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
14. Nelder, J.A., and R. Mead, 1965. A simplex method for function minimization. *Computer Journal* 7: 308-313.
15. NRCS, 1985. Urban hydrology for small watersheds, 2-1. 210-VI-TR-55. Natural Resources Conservation Service, USDA,
16. Park, S.W., 1997. Estimating runoff curve number for rice paddies and its application to watershed hydrology, 21-23. KOSEF 951-0601-002-2.
17. Shin, M.H., J.A. Lee, S.U. Cheon, Y.J. Lee, K.J. Lim, and J.D. Choi, 2010. Analysis of the characteristics of NPS runoff and application of L-THIA model at upper Daecheong Reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 1-11.
18. Yoon, R.Y. D.H. Kim, H.H. Kwon, S.C. Shin, and K.I. Son, 2006. Assessing the impact of urbanization on runoff and non-point source pollution using the GIS L-THIA. *2006 Annual Conference Proceeding of KWR*, 1802-1806.