



대청호 상류 유역의 비점오염원 유출특성 분석 및 L-THIA 모형 적용성 평가

Analysis of the Characteristics of NPS Runoff and Application of L-THIA model at Upper Daecheong Reservoir

신민환* · 이재안* · 천세억* · 이열재* · 임경재** · 최중대**,[†]

Shin, Min Hwan* · Lee, Jae An* · Cheon, Se Uk* · Lee, Yeoul Jae* · Lim, Kyoung Jae** · Choi, Joong Dae**,[†]

ABSTRACT

Generation and transportation of runoff and pollutant loads within watershed generated eutrophication at Daecheong reservoir. To improve water quality at Daecheong reservoir, the best management practices should be developed and applied at upper watersheds for water quality improvement at downstream areas. In this study, two small watersheds of upper Daecheong reservoir were selected. The Long-Term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) model has been widely used for the estimation of the direct runoff worldwide. To apply the L-THIA ArcView GIS model was evaluated for direct runoff and water quality estimation at small watershed. And the Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) was used for direct runoff separating from total flow. As a result, the R^2 (Coefficient of determination) value and Nash-Sutcliffe coefficient value for direct runoff comparison at An-nae watershed were 0.81 and 0.71, respectively. And the R^2 value and Nash-Sutcliffe coefficient value at Wol-oe were 0.95 and 0.93. The R^2 value of BOD, TOC, T-N and T-P at An-nae watershed were BOD 0.94, TOC 0.81, T-N 0.94 and T-P 0.89. And the R^2 value of BOD, TOC, T-N and T-P at Wol-oe watershed were BOD 0.80, TOC 0.93, T-N 0.86 and T-P 0.65. The result that estimated pollutant loadings using the L-THIA ArcView GIS model reflected well the measured pollutant loadings except for T-P in Wol-oe watershed. With L-THIA ArcView GIS model, the direct runoff and non-point pollutant (NPS) loadings in the watershed could be analyzed through simple input data such as daily rainfall, land uses, and hydrologic soil group.

Keywords: Direct Runoff; L-THIA model; NPS; Water quality.

1. 서 론

하천으로 유입되는 오염원은 점오염원과 비점오염원으로 크게 구분할 수 있다. 비점오염원은 강우가 토양으로 침투하지 못하고 토양이나 오염원들과 함께 하천으로 유입되는 것을 말하며, 다양한 발생원으로 인한 처리의 어려움 때문에 수계에서의 상대적인 비중이 점차 커져가고 있다. 이러한 비점오염원은 우리나라 중부권의 중요한 수자원 역할을 하고 있는 대청호 유역에도 영향을 미치고 있다. Kwon et al. (2002)에 의하면 대청호는 대청호 상류의 각 시·군에서 발생하는 점오염원 등과 산림 및 경작지 등의 비점오염원으로 인해 부영양화와 조류발생이 심화되고 있다고 하였다. 대청호 유역의 경우 1997년 조

류예보제가 시행된 이래 1999년을 제외하고 매년 조류주의보가 발령되었고, 2008년도까지 4번의 조류경보가 발령되었으며, 2001년에는 조류대발생이 발령되는 등 조류발생에 의한 수질문제가 지속되고 있는 실정이다. 이러한 대청호 유역의 수질오염 문제를 해결하기 위해선 우선 강우유출에 의한 비점오염물질이 어디서 얼마나 발생하는지에 대한 정량적인 조사가 필요하다 (Shin et al., 2007).

대청호 수역내에 웨어를 설치하여 조류성장 억제에 대한 연구 (Kim et al., 2007)와 대청호 유역의 수질관리를 위한 연구 (Lee, 2000; Cheon et al., 2006) 등을 통하여 대청호 수질관리 대책을 위한 선행연구가 이루어져왔다. 그러나 상류유역의 수질변화가 대청호에 미치는 영향 및 모델링을 통한 영향분석에 관한 연구사례가 거의 없는 실정이다.

유역의 오염원에 대한 정량적인 조사를 위해서는 실측 유량과 농도를 조사하여 토지이용별로 오염원을 산정하는 방법이 가장 정확하다. 그러나 이 방법에는 많은 비용과 시간 그리고 노력이 필요하다 (Shin et al., 2008). 실제 측정된 유량자료가 부족하거나 없을 경우에는 미국 자연자원보호청 (Natural

* 국립환경과학원 금강물환경연구소
** 강원대학교 지역건설공학과
[†] Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6464
Fax: +82-33-244-6702
E-mail address: jdchoi@kangwon.ac.kr

2009년 10월 26일 투고
2009년 12월 1일 심사완료
2009년 12월 1일 게재확정

Resources Conservation Service: NRCS)에서 개발한 유출곡선지수 (Curve Number: CN)에 의해 산정하는 방법이 널리 쓰이고 있다 (Kim et al., 2007a). 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., 2007b).

본 연구에서는 대청호 상류유역의 소하천 (안내천과 월외천)에서 실측 모니터링을 통한 데이터를 이용하여 강우유출특성을 분석하고, 실측데이터와 L-THIA ArcView GIS 모델을 이용하여 데이터를 비교하고, 대청호 상류유역의 직접유출량과 오염물질 발생량을 모의 및 평가하는 것이다.

II. 연구방법

1. 연구유역

본 연구의 대상유역은 대청호 상류유역으로 충청북도 옥천군 안내면의 소하천인 안내천과 월외천이다. 대청호 유역의 연평균 강수량과 대청호로 유입되는 유입량은 1,230.0 mm와 95.6 m³/s이고, 총 저수량과 유효저수량은 1,490×10⁶ m³과 790×10⁶ m³이다 (Korea Water Resources Corporation, 2006). ArcGIS 프로그램과 수치지도 그리고 토지이용도를 이용하여 산정된 안내천의 유역면적은 16.5 km²로 유역의 약 69.5%가 산림, 농업 및 초지지역이 25.3% 그리고 주거지역이 2.6%로

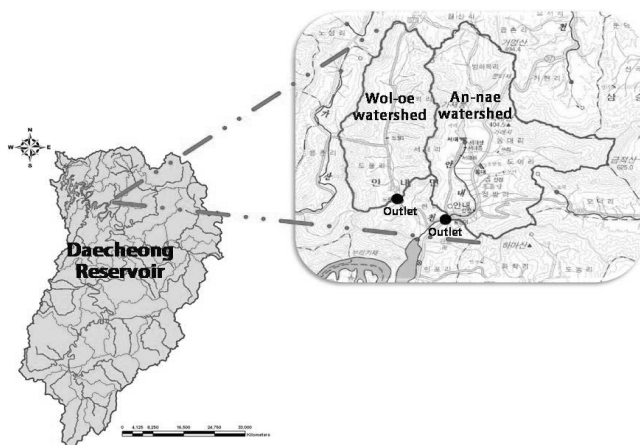


Fig. 1 Sketch of An-nae and Wol-oe watershed

조사되었다. 월외천의 유역면적은 9.9 km²로 유역의 80.51%가 산림, 농업 및 초지지역이 16.1%로 조사되었다. 두 유역의 토양은 주로 대신토이 분포되어 있으며, 수문학적 토양군은 미국 USDA Soil Conservation Service (SCS) 기준으로 주로 A그룹 (침투속도 7.6 mm/hr 이상)으로 분류된다 (SCS, 1985). 대청호 상류유역의 안내천과 월외천의 유역의 유역형상과 측정지점 (outlet)은 Fig. 1과 같다.

2. 실측 유량 및 수질

대청호 상류유역의 소하천인 안내천과 월외천을 대상으로 2009년 3월 11일부터 2009년 8월 13일까지 강우시 발생하는 강우유출수를 조사하였다. 조사방법은 기상청의 일기예보를 토대로 강우발생을 예측하고 각 지점에 모니터링 장치를 설치하였다. 수위측정을 위한 수위계 (YSI 6600)를 설치하여 수위변화를 측정하고, 수위의 변화가 발생하였을 때 유량계 (Flowtracker)를 이용하여 실측 유량을 측정하였다. 측정된 유량자료를 이용하여 수위-유량 곡선을 작성하여 유량을 산정하였다. 또한 수질분석을 위하여 자동수질시료채취기 (ISCO sampler 6712)를 설치하여 시간단위의 시료를 채취한 뒤 수질농도를 측정하였다. 수질항목은 유기물질인 BOD₅, COD_{Mn}, TOC, T-N, T-P 항목에 대하여 수질오염공정시험법으로 분석하였다. 수문분석을 위한 강우자료는 기상청의 자동기상관측자료 (AWS)와 간이 강우량 측정기를 비교하여 분석하였다.

3. EMC와 오염부하량 산정

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 유량기중평균농도 (Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였다.

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

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 i번째의 구간별 유량 (m³)이고, C(i)는 i번째 분석된 수질항목 농도 (mg/L), n은 각 강우사상마다 분석된 시료의 개수이다.

4. L-THIA ArcView GIS

가. L-THIA ArcView GIS 시스템 개요

미계측 지역의 유출량을 예측하기 위해 침투량, 증발산량, 토양수분량, 강우강도 등의 인자를 하나의 지표로 표현하기 위하여 SCS에서는 Curve Number (CN)를 제안하였다 (Mockus, 1964; SCS, 1972; Rallison and Cronshey, 1979; Rallison and Miller, 1982). CN 방법은 우량과 유효유량과의 관계를 나타내는 지수로서 0에서 100 사이의 값을 가지는 무차원 지수이다. 불투수층 또는 수표면에서 CN 값은 100이며, 자연적인 지표면에서의 CN 값은 100보다 작다. 유출곡선지수 CN과 유역의 최대잠재보유수량 S와의 관계는 다음 식 (3)과 같다 (SCS, 1972).

$$CN = \frac{25,400}{S + 254}, \quad S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (3)$$

L-THIA ArcView GIS 모델은 CN방법으로 토지이용도, 토양도, 일별 강우량 자료를 이용하여 직접유출량을 산정한다. 토지이용도와 토양도 그리고 일별 강우량 자료 등 3개의 간단한 입력자료만을 이용하여 장기 직접유출 모의가 가능하고, 토지이용별 원단위 값을 이용해 오염부하량을 산출할 수 있다. 또한 인터넷을 이용하여 L-THIA 모형을 운영할 수 있도록 Web 기반 (<http://www.ecn.purdue.edu/runoff/>) L-THIA 시스템이 개발되어 사용자들에 의해 보다 편리하게 이용되고 있다 (Lim et al., 2001; Kim et al., 2007b). 본 연구에 사용된 L-THIA 모델의 개요는 Fig. 2와 같다.

나. L-THIA ArcView GIS 입력 자료 구축

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. 안내천과 월외천 유역의 토지이용도는 Fig. 3, 4와 같다.

안내천과 월외천 유역의 토양속성은 농업과학기술원의 정밀 토양도 (1:25,000) (Fig. 5, 6)를 사용하였으며, 대부분 대산통

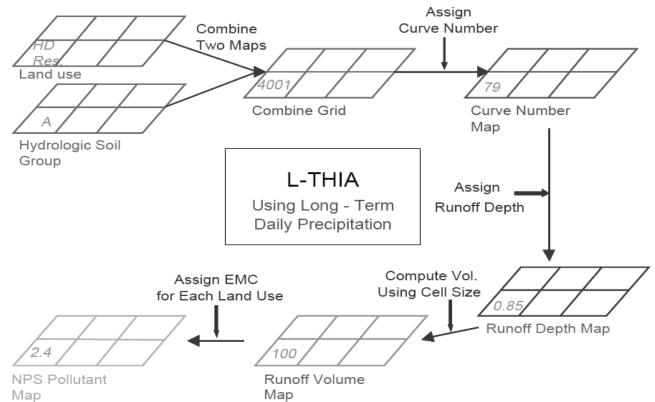


Fig. 2 Overview of the L-THIA ArcView GIS system (Lim et al., 2001)

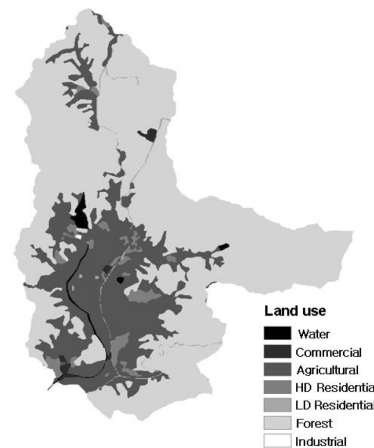


Fig. 3 Land uses at An-nae watershed

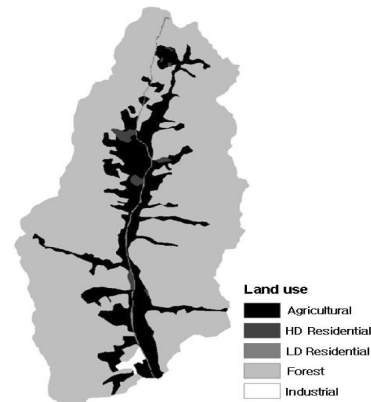


Fig. 4 Land uses at Wol-oe watershed

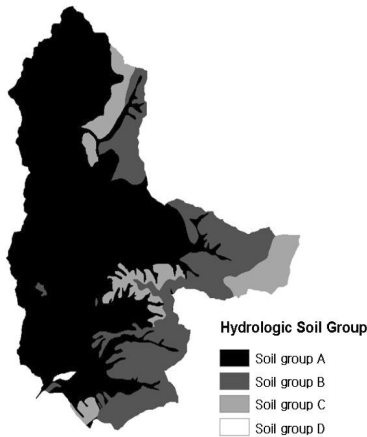


Fig. 5 Soil Group at An-nae watershed

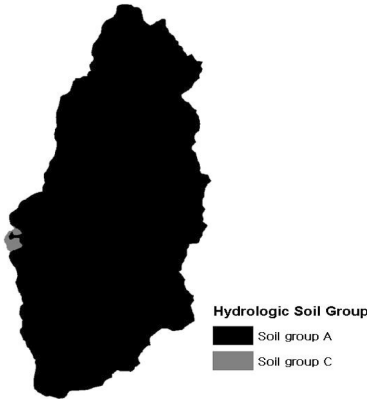


Fig. 6 Soil Group at Wol-oe watershed

이 분포되어있다. 대산통은 미농무성 (USGS)의 새로운 분류방법으로 분류하면 fine silty, mixed, mesic family of Typic Dystrudepts로 분류되고 미사식양질계 적황생토에 속한다. 토양배수는 양호하고 투수성은 느리며 유거는 보통이거나 빠르다 (Korean soils information system, 2005). 본 연구에 사용된 토양도는 Fig. 5, 6과 같다.

5. 직접/기저유출량

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 입력자료를 직접 준비할 필요 없이 미국 국립지리국의 유량 자료를 실시간으로 질의하여 수문분석을 수행하는 사용자 중심 시스템이

다 (Lim et al., 2005). Signal processing 학문분야에서 고주파와 저주파를 분리하는데 사용되는 방식인 Digital filtering은 전 세계적으로 수문분석에 널리 이용되고 있다 (Lyne and Hollick, 1979; Arnold and Allen, 1999; Eckhardt, 2005). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형에서 직접유출과 기저유출 분리시 사용되는 Digital filtering 기반의 BFLOW 필터는 대수층을 전혀 고려하지 않아 Eckhardt (2005)는 BFI_{max}를 이용하여 대수층 특성을 고려한 기저유출 분리모듈을 제안하였다. WHAT 시스템은 수문곡선의 감수곡선 자료를 이용하여 WHAT 최적화 모듈로 유역내 최적의 BFI_{max} 값을 산정하는 Digital filtering 방식이며, 기존의 Digital filtering 방식에 비해 보다 유역 내 특성을 반영한 객관적이고 현실적인 방식의 수문분석이다 (Kim et al., 2007b). WHAT Web GIS 시스템은 일별·월별·연별 유출량 뿐만 아니라 시간별 유출량을 이용하여 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있는 기능도 제공하고 있다. 본 연구에서는 안내천과 월외천의 강우시 산정된 유출량을 이용하여 직접유출/기저유출 분리 후 L-THIA ArcView GIS 모형의 입력자료로 사용하였다.

6. L-THIA ArcView GIS 모형 보정

L-THIA ArcView GIS 모형을 검·보정 하기 위하여 보정모의 기간을 생장기 (growing season)와 휴면기 (dormant season)로 구분하였다. 생장기는 4월 15일~10월 15일로 분류하였고, 휴면기는 1월 1일~4월 14일과 10월 16일~12월 31일로 분류하였다 (Table 5). 분류한 기간을 기준으로 선행토양함수조건 (AMC, Antecedent Moisture Condition)에 따른 토지이용별 CN값을 산정하였다. Kim et al. (2007b)에 의하면 선행토양함수조건 (AMC, Antecedent Moisture Condition)을 고려하여 L-THIA ArcView GIS 예측 연 직접유출량의 값과 WHAT 시스템에서 분리된 연 직접유출량의 값 비교결과 오차가 7.99%로 실측치와 근사하게 모의되었다고 하였다.

CN_{II} 값은 AMC_{II}의 조건 (강수량이 보통인 상태)에서 토지이용과 토양상태에 따른 값을 나타낸다. 직접유출 산정시 생장기와 휴면기를 구분하여 선행 5일 강우량에 따른 AMC I (건기), AMC_{III} (우기)에 해당하는 CN_I, CN_{III}를 적용한다. CN_I 과 CN_{III}에서 CN_{II}가 사용된 식은 식 (4), (5)와 같다.

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (4)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (5)$$

Table 1 Criteria of AMC Adjustment in CN method (SCS, 1985)

AMC	Total 5-day antecedent rainfall (mm)	
	Growing season	Dormant season
I	$P_5 < 12.70$	$P_5 < 35.56$
II	$12.70 < P_5 < 27.94$	$35.56 < P_5 < 53.34$
III	$P_5 > 27.94$	$P_5 > 53.34$

Table 2 Separated Flow of An-nae watershed using WHAT system

Date	Rainfall (mm)	Total stream flow (m ³)	Direct runoff (m ³)	Based flow (m ³)	Direct runoff rate
3.11~3.12	8.0	790.56	376.67	413.89	47.65%
4.20~4.21	26.0	724.68	301.23	423.45	41.57%
5.15~5.17	47.0	3,582.36	1,057.63	2,524.73	29.52%
6.3	17.0	686.16	315.50	370.65	45.98%
6.9~6.10	10.5	2,789.26	1,134.08	1,655.18	40.66%
6.20~6.21	33.0	3,838.96	2,115.26	1,723.70	55.10%
7.2~7.3	5.0	42,330.20	16,402.73	25,927.47	38.75%
7.7~7.8	57.0	376,381.89	125,551.70	250,830.19	33.36%
7.9~7.11	84.0	536,907.58	161,835.10	375,072.48	30.14%
7.12~7.13	63.5	259,247.08	92,453.33	166,793.75	35.66%
7.17~7.18	34.5	152,876.19	48,167.39	104,708.80	31.51%
7.19	8.0	88,193.28	30,693.26	57,500.02	34.80%
8.12~8.13	60.0	85,000.10	38,346.44	46,653.66	45.11%

Table 3 Separated Flow of Wol-oe watershed using WHAT system

Date	Rainfall (mm)	Total stream flow (m ³)	Direct runoff (m ³)	Based flow (m ³)	Direct runoff rate
3.11~3.12	8.0	314.1	156.99	157.11	49.98%
4.20~4.21	26.0	316.08	143.74	172.34	45.47%
5.16~17	47.0	4,673.52	1,765.61	2,907.91	37.78%
5.21~22	51.5	4,014.72	1,206.98	2,807.74	30.06%
6.3	17.0	849.24	379.22	470.02	44.65%
6.9~6.10	10.5	1,680.92	696.03	984.89	41.41%
6.20~6.21	33.0	10,648.48	4,148.47	6,500.01	38.96%
7.2~7.3	5.0	3,374.33	1,330.83	2,043.50	39.44%
7.7~7.8	57.0	52,134.84	18,958.38	33,176.46	36.36%
7.9~7.11	84.0	223,946.90	99,478.11	124,468.79	44.42%
7.12~7.14	70.0	991,275.30	163,726.60	827,548.70	16.52%
7.15~7.16	157.5	1,033,116.88	478,704.34	554,412.54	46.34%
7.17~7.18	34.5	68,131.77	22,982.99	45,148.78	33.73%
7.19	8.0	21,248.97	8,943.75	12,305.22	42.09%
7.21~8.22	68.0	238,986.81	77,441.63	161,545.18	32.40%
8.11~8.13	60.0	13,048.65	6,114.90	6,933.75	46.86%

III. 결과 및 고찰

1. 수문분석

연구기간동안 발생한 강우량은 총 829.2 mm가 발생하였으며 안내천 13회, 월외천 16회의 강우사상에 대하여 강우유출수를 조사하였다. 안내천의 경우 집중호우로 인한 유출증가와 강한 유속으로 인해 강우유출수 조사 중 유량 측정이 불가능하여 월외천 보다 조사횟수가 적다. 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. 조사된 강우사상의 강우량과 총 유출량, 직접 유출량 그리고 WHAT Web GIS를 이용하여 분리된 기저유출량은 Table 2, 3과 같다.

2. 직접/기저 유출량 산정

실측된 유출량 자료를 이용하여 WHAT 시스템을 이용하여

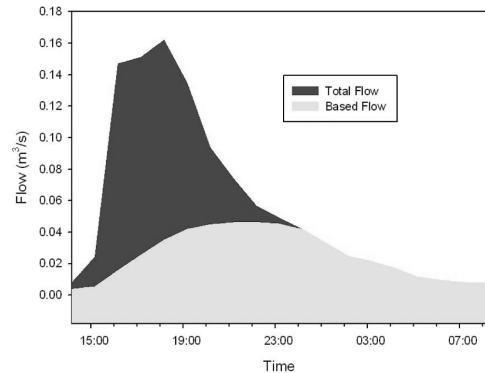


Fig. 7 Separation of flow (An-nae)

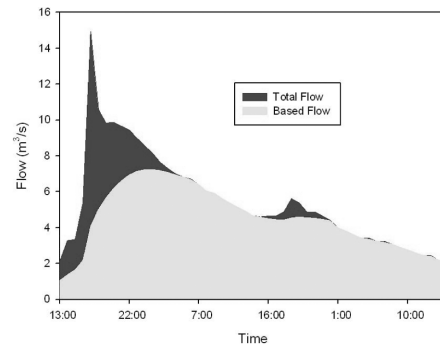


Fig. 8 Separation of flow (Wol-oe)

Table 4 Calculated Pollutant Load and EMC at An-nae

Date	Rainfall (mm)	Pollutant Load (g)					EMC (mg/L)				
		BOD	COD _{Mn}	TOC	T-N	T-P	BOD	COD _{Mn}	TOC	T-N	T-P
2001-03-11	8.00	-	0.8	0.538	1.095	0.011	-	2.2	1.429	2.906	0.029
2001-04-18	26.00	-	2.1	1.654	0.968	0.069	-	6.9	5.491	3.213	0.228
2001-05-15	47.00	-	6.3	4.548	3.451	0.277	-	5.9	4.300	3.263	0.262
2001-06-03	17.00	-	2.0	1.421	1.315	0.047	-	6.3	4.503	4.168	0.148
2001-06-09	10.50	-	5.5	5.682	3.856	0.120	-	4.8	5.010	3.400	0.106
2001-06-20	33.00	-	13.5	10.112	9.201	0.400	-	6.4	4.780	4.350	0.189
2001-07-02	5.00	-	50.8	84.630	130.959	0.771	-	3.1	5.159	7.984	0.047
2001-07-07	57.00	-	469.5	638.963	642.293	27.097	-	3.7	5.089	5.116	0.216
2001-07-09	84.00	390.8	1,657.5	791.829	1,758.174	42.139	2.4	10.2	4.893	10.864	0.260
2001-07-12	63.50	120.6	599.0	316.979	417.753	26.308	1.3	6.5	3.429	4.519	0.285
2001-07-17	34.50	71.1	326.4	169.341	189.229	7.575	1.5	6.8	3.516	3.929	0.157
2001-07-19	8.00	37.9	127.8	94.689	111.994	1.665	1.2	4.2	3.085	3.649	0.054
2001-08-11	60.00	39.8	153.7	135.839	118.959	1.430	1.0	4.0	3.542	3.102	0.037

Table 5 Calculated Pollutant Load and EMC at Wol-oe

Date	Rainfall (mm)	Pollutant Load (g)					EMC (mg/L)				
		BOD	COD _{Mn}	TOC	T-N	T-P	BOD	COD _{Mn}	TOC	T-N	T-P
2001-03-11	8.00	-	0.2	0.154	0.490	0.001	-	1.6	0.978	3.122	0.006
2001-04-18	26.00	-	0.5	0.367	0.490	0.002	-	3.4	2.551	3.407	0.014
2001-05-15	47.00	-	8.1	4.659	6.079	0.078	-	4.6	2.639	3.443	0.044
2001-05-21	51.50	-	6.7	16.241	5.675	0.200	-	5.5	13.456	4.702	0.166
2001-06-03	17.00	-	1.8	1.178	2.131	0.011	-	4.8	3.106	5.620	0.030
2001-06-09	10.50	-	2.4	2.896	2.901	0.013	-	3.5	4.160	4.169	0.019
2001-06-20	33.00	-	23.0	17.543	23.200	0.158	-	5.5	4.229	5.592	0.038
2001-07-02	5.00	-	3.1	2.824	15.442	0.045	-	2.3	2.122	11.603	0.034
2001-07-07	57.00	18.5	116.8	74.128	86.707	3.522	1.0	6.2	3.910	4.574	0.186
2001-07-09	84.00	170.0	714.4	334.097	713.900	17.884	1.7	7.2	3.359	7.176	0.180
2001-07-12	70.00	369.2	1,357.5	803.585	1,633.949	35.340	1.3	4.8	2.840	5.775	0.125
2001-07-15	157.50	632.2	8,448.7	2,160.729	3,423.767	107.836	1.3	17.6	4.514	7.152	0.225
2001-07-17	34.50	18.9	59.6	51.358	107.636	0.745	0.8	2.6	2.235	4.683	0.032
2001-07-19	8.00	6.9	20.0	14.400	36.842	0.274	0.3	0.9	0.678	1.734	0.013
2001-07-21	68.00	256.0	2,871.1	141.957	1,168.537	88.780	3.3	37.1	1.833	15.089	1.146
2001-08-11	60.00	5.1	29.5	11.103	15.761	0.081	0.8	4.8	1.816	2.577	0.013

직접유출량과 기저유출을 분리하였다. Fig. 7, 8은 2009년 7월 14일~16일에 발생한 유출을 WHAT 시스템을 이용하여 기저유출을 분리한 것이다. 연구 기간내에 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 m³의 범위로 나타

났고, 월외천 유역이 8.0~157.5 mm의 강우량이 발생한 동안 156.99~478,704.34 m³로 나타났다. 안내천 유역의 7월 15~16일에 발생한 157.5 mm의 강우에 대해서는 모니터링 장비를 설치하였던 다리가 집중호우로 인해 붕괴되어 유량 및 수질 측정에 문제가 되어 본 연구에서 삭제하였다. 강우시 산정된 안내천 유역의 직접유출량은 총 유출량의 30.14~55.10%로 나타났고, 월외천은 16.52~49.98%로 나타났다. 안내천 유

역의 6월 20일~21일예의 직접유출률이 55.1%로 가장 크게 나타났고 (Fig. 7), 월외천 유역의 7월 12일~14일까지의 직접유출률은 7월 11일까지 발생한 선행강우사상의 영향으로 가장 적게 산정 된 것을 알 수 있었다 (Fig. 8).

3. EMC와 오염 부하량

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 (Table 4, 5). 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.

각 강우사상에 대하여 실측한 유량과 농도를 이용하여 오염 부하를 산정하였다. 산정된 오염부하량은 안내천 유역이 BOD₅ 37.9~390.9 g, COD_{Mn} 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 나타났고, 월외천 유역이 BOD₅ 5.9~632.2 g, COD_{Mn} 0.2~8,448.7 g, TOC 0.15~2,160.73 g, T-N 0.490~3,423.767 g, T-P 0.001~107.836 g의 범위로 나타났다 (Table 4, 5). 동일한 강우가 발생하였을 때 각 항목의 오염부하는 월외천 유역이 대체로 크게 나타났다. 이는 조사지점의 상류로부터 발생하는 유량과 농도의 차이로 판단되고, 월외천에 비해 안내천 유역의 면적이 크지만 투수층인 산림의 면적이 커서 오염부하량에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 BOD₅ 항목의 경우 09년 7월부터 분석을 하여 3월부터 6월까지의 분석데이터가 없어, 추가적인 모니터링을 통해 오염부하의 정량화가 필요할 것으로 사료된다.

실측된 유출량을 이용하여 분리된 직접유출량과 L-THIA ArcView GIS 모형으로 산정한 직접 유출량 자료를 비교·분

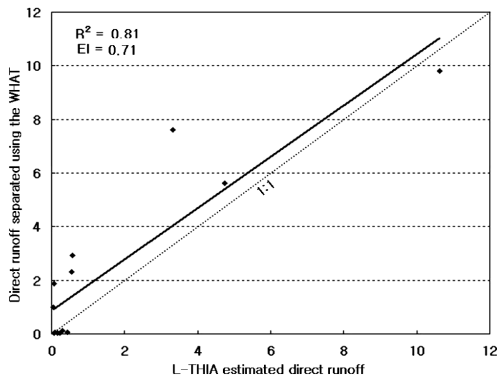


Fig. 9 R² and EI at An-nae watershed.

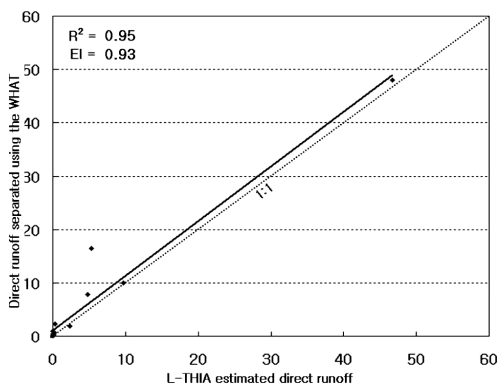


Fig. 10 R² and EI at Wol-oe watershed.

Table 6 Measured Curve number under AMC I , II , III conditions in An-nae watershed

Land use	Soil Group	Curve Number		
		AMC I	AMC II	AMC III
Forest	B	34	55	74
Agricultural	B	56	75	87
Agricultural	C	66	82	91
HD Residential	C	79	90	95
HD Residential	B	70	85	93
Forest	C	49	70	84
Forest	D	58	77	89
LD Residential	B	49	70	84
LD Residential	C	63	80	90
Forest	A	15	30	50
LD Residential	D	70	85	93
LD Residential	A	33	54	73
Commercial	A	77	89	95
Commercial	B	83	92	96
Agricultural	A	43	64	80
Agricultural	D	70	85	93
Water	B	100	100	100
Industrial	B	75	88	94
Water	A	100	100	100
HD Residential	D	83	92	96
Water	C	100	100	100
Commercial	C	87	94	97

석하였다 (Fig. 9, 10). 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. 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. 그러나 안내천 유역의 경우도 유효지수가 0.71로 Donigian and

Love (2003)의 연구에 의하면 본 연구에서 산정된 유출량이 전반적으로 “좋음 (good)” 이상으로 평가되는 것으로 나타났다.

4. L-THIA 모형 보정 결과

L-THIA 모형을 이용하여 토지이용과 토양그룹에 따른 AMC II 조건의 CN값을 산정하였고, 이것을 이용하여 AMC I, III 조건의 CN값을 산정하여 일별 유출량 산정시 적용하였다. Table 6, 7은 안내천과 월외천의 CN값 산정 결과이다.

Table 7 Measured Curve number under AMC I, II, III conditions in Wol-oe watershed

Land use	Soil Group	Curve Number		
		AMC I	AMC II	AMC III
Forest	B	34	55	74
LD Residential	B	49	70	84
Agricultural	B	56	75	87
HD Residential	B	70	85	93
Forest	D	58	77	89
Agricultural	D	70	85	93
Industrial	B	75	88	94

5. L-THIA GIS 모형 적용성 평가

안내천과 월외천 유역에서 실측된 유량 및 농도자료를 이용하여 산정한 오염부하량과 ‘4대강 물환경연구소’에서 장기모니터링을 통해 산정된 토지이용별 EMC (BOD₅, TOC, T-N, T-P) 결과(Jung 2008; Lee 2008; You 2008; Shin 2008)를 반영하여 L-THIA ArcView GIS 모형으로 산정한 오염부하량을 비교·평가하였다 (Fig. 11, 12). COD_{Mn} 항목의 경우 안내천과 월외천 유역을 대상으로 EMC와 오염부하를 산정하였으나, L-THIA ArcView GIS 모형에는 아직까지 구축이 되어있지 않기

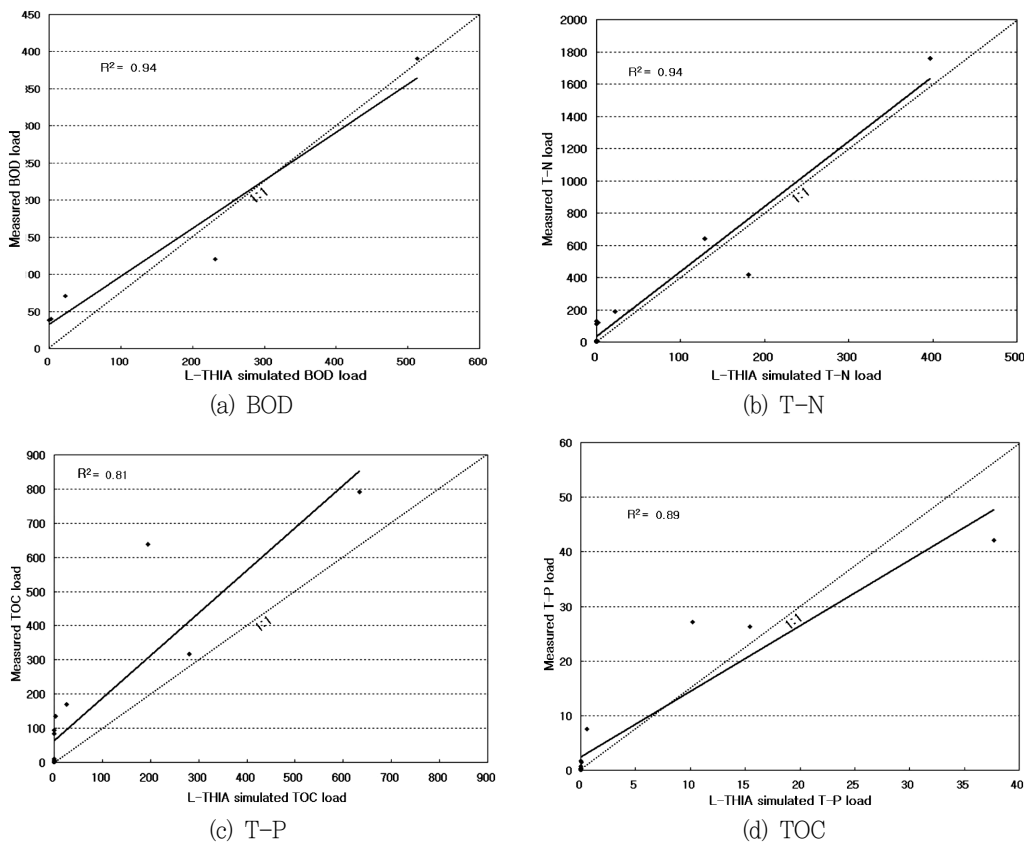


Fig. 11 R^2 of pollutant load estimation (An-nae watershed)

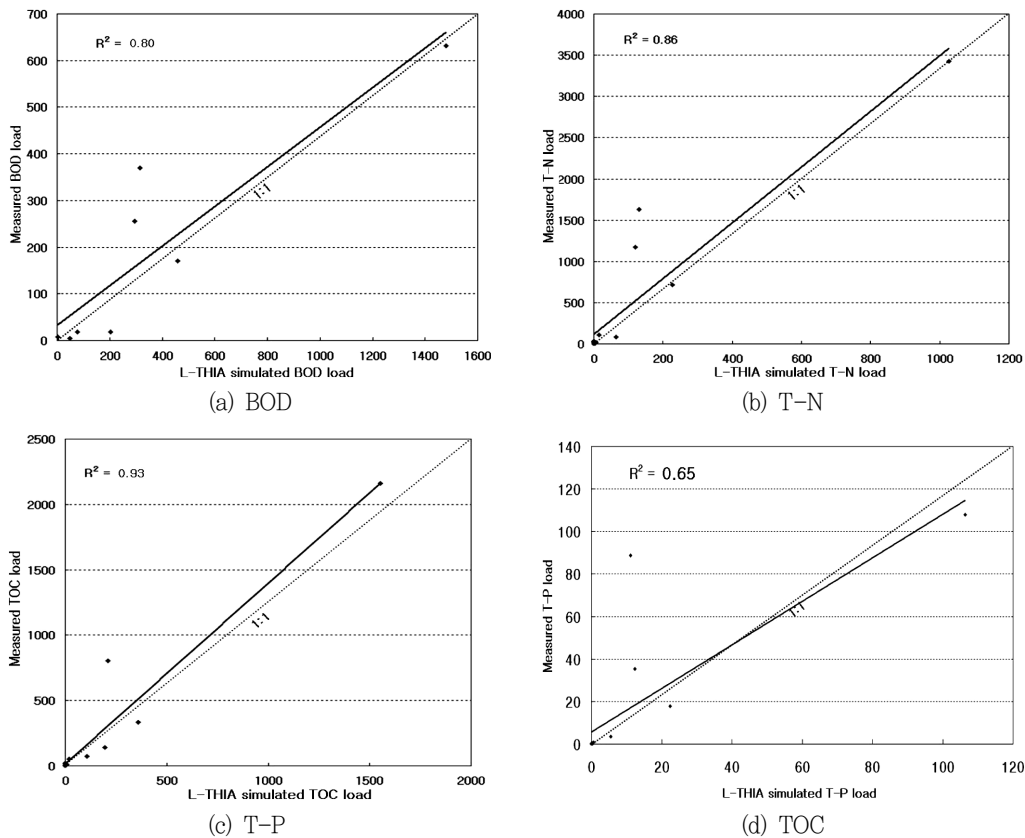


Fig. 12 R^2 of pollutant load estimation (Wol-oe watershed)

때문에 적용성 평가는 하지 않았다. 안내천 유역에서 산정된 오염부하량의 BOD_5 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_5 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. 그러나 Ramanarayanan et al. (1997)에 의하면 결정계수 (R^2)가 0.5, 유효지수 (EI)가 0.4 이상이면, 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 볼 수 있다고 하였기 때문에, 본 연구의 결과로 T-P 항목을 포함한 모든 항목에 대하여 대청호 상류의 소유역을 모의하는데 적합할 것으로 판단된다. 또한 강우데이터의 시간분석과 토지이용도와 토양도의 시·공간적 변화의 분석을 고려하면 변화되는 유출량과 오염부하산정도 가능 할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 대청호 상류에 위치하고 있는 소하천에 대하여 유

량 및 농도를 측정한 실측 데이터와 4대강 물환경연구소에서 측정한 EMC 농도를 L-THIA ArcView GIS 모형에 입력하여 산정된 데이터를 비교·분석하고, 안내천과 월외천 유역의 직접 유출량 산정을 위한 L-THIA ArcView GIS의 적용성을 평가하고자 하였다.

1. 실측된 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. 안내천과 같은 농촌유역을 포함하고 있는 유역의 경우 농번기에 논이나 밭에 사용되는 수량이 적지 않기 때문에 오염부하에 미치는 영향이 크므로 농촌유역에서 사용되는 용수량에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

2. 실측된 유출량을 이용하여 분리된 직접유출량과 L-THIA ArcView GIS 모형으로 산정한 직접 유출량 자료를 비교·분석한 결과 안내천 유역의 R^2 와 EI가 0.81과 0.71로 나타났고, 월외천 유역의 R^2 와 EI는 0.95와 0.93으로 나타났다. 또한 안내천 유역에서 산정된 오염부하량의 BOD_5 R^2 는 0.94, T-P는 0.89, TOC는 0.81, T-N은 0.94으로 나타났고, 월외천 유역

에서 산정된 오염부하량의 BOD₅ R²는 0.80, TOC는 0.93, T-N은 0.86, T-P는 0.65로 나타났다. 본 연구의 결과로 대청호 상류의 소하천에 대한 L-THIA ArcView GIS 모형 적용이 오염부하량 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.

REFERENCES

1. Arnold, J. G. and Allen, P. M., 1999. Validation of Automated Methods for Estimating Baseflow and Groundwater Recharge From Stream Flow Records, *Journal of American Water Resources Association* 35(2): 411-424.
2. Cheon, S. U., J. A. Lee, J. J. Lee, Y. B. Yoo, K. C. Bang, and Y. J. Lee, 2006. Relationship among Inflow Volume, Water Quality and Algal Growth in the Daecheong Lake. *Journal of Korean Society on Water Quality* 22(2): 342-348 (in Korean).
3. Donigian, A. S., and J. T. Love, 2003. Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling. WEF TMDL 2003, November 16-19, *WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM*, Illinois, Chicago.
4. Eckhardt, K. 2005. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation, *Hydrological Processes*, 19(2): 507-515.
5. Jung, M. S., 2008. Long-term monitoring of non-point source pollutants discharge and reduction measures study. Han River Environment Research Center (in Korean).
6. Kim, Y. K., S. W. Chung, H. S. Lee, H. S. Lee, and Y. R. Jung, 2007. Numerical Modeling Effects of a Skimmer Weir Method on the Control of Algal Growth in Daecheong Reservoir. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(5): 581-590 (in Korean).
7. Kim, J. G., K. J. Lim, Y. S. Park, S. G. Heo, J. H. Park, J. H. Ahn, K. S. Kim, and J. D. Choi, 2007a. 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 (in Korean).
8. 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 (in Korean).
9. Korea Water Resources Corporation, 2006.
10. Korean soils information system, 2005. <http://asis.rda.go.kr>. Accessed Sep. 2009.
11. 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 (in Korean).
12. Lee, J. B., 2008. Long-term monitoring of non-point source pollutants discharge and reduction measures study. Yeongsan River Environment Research Center (in Korean).
13. Lee, J. H., 2000. Management of Nonpoint Sources in Watershed -with reference to Daechong Reservoir in Korea. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* 9(3): 163-176 (in Korean).
14. Lim K. J., B. A. Engel, Kim Y., Bhaduri B., and Harbor J., 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.
15. 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.
16. Lyne, Y. D. and Hollick, M., 1979. Stochastic Time-Variable Rainfall Runoff modeling, In: Hydro. and Water Resour, Symp, Institution of Engineers Australia, Perth, Australia, 89-92.
17. Mockus, V., 1964. Chapter 10. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall, Section 4. Hydrology, National Engineering Handbook. Washington, D. C.
18. Rallison R. E. and Cronshey, R. C., 1979. Discussion to runoff curve numbers with varying soil moisture. *Journal of Irrifition and Drainage Engineering, ASCE*, Vol. 105(4): 439-441.

19. Rallison, R. E. and Miller, N., 1982. Past, resent, and further SCS runoff procedure. proceedings of International sumpsium on Rainfall-Runoff Modeling, *Water Resource*. Rublished Littleton, Co.
20. Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M. and McFarland, A. M. S., 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management, Minneapolis, MN. Paper No. 97-2209.
21. Shin, D. S., 2008. Long-term monitoring of non-point source pollutants discharge and reduction measures study, 225-250. Geum River Environment Research Center (in Korean).
22. Shin, M. H., Y. C. Shin, S. G. Heo, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2007. Analysis of Flow-Weighted Mean Concentration (FWMC) Characteristics from Rural Watersheds. *Journal of the korean society of agricultural engineers* 49(6): 3-9 (in Korean).
23. 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 (in Korean).
24. Shin, M. H., J. Y. Seo, Y. H. Choi, J. G. Kim, D. S. Shin, Y. J. Lee, M. S. Jung, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Evaluation of LOADEST Model Applicability for NPS Pollutant loads Estimation from Agricultural Watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(2): 212-220 (in Korean).
25. Soil Conservation Service, 1972. *National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology*. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D. C.
26. Soil Conservation Service, 1985. *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D. C.
27. You, J. J., 2008. Long-term monitoring of non-point source pollutants discharge and reduction measures study. Nakdong River Environment Research Center (in Korean).