

연구논문

황강유역에서의 유역규모를 고려한 HSPF 모형의 적용성 평가

최현구* · 한건연* · 황보현** · 조완희***

경북대학교 건축·토목공학부*, (주)유신 수공본부**, 한국수자원공사 댐·유역관리처***

(2011년 4월 21일 접수, 2011년 7월 28일 승인)

Application Analysis of HSPF Model Considering Watershed Scale in Hwang River Basin

Choi, Hyun Gu* · Han, Kun Yeun* · Hwangbo, Hyun** · Cho, Wan Hee***

School of Architecture & Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea*

Water Resources Division, Yooshin Engineering Corporation, Seoul, 135-936, Korea**

Dam & Watershed Department, Kwater, Daejeon, 306-711, Korea***

(Manuscript received 21 April 2011; accepted 28 July 2011)

Abstract

The purpose of this study is to estimate overall reliability and applicability of the watershed modeling for systematic management of point and non-point sources via water quality analysis and prediction of runoff discharge within watershed. Recently, runoff characteristics and pollutant characteristics have been changing in watershed by anomaly climate and urbanization. In this study, the effects of watershed scale were analyzed in runoff and water quality modeling using HSPF. In case of correlation coefficient, its range was from 0.936 to 0.984 in case A(divided - 2 small watersheds). On the other hand, its range was form 0.840 to 0.899 in case B(united - 1 watershed). In case of Nash-Sutcliffe coefficient, its range was from 0.718 to 0.966 in case A. On the other hand, its range was from 0.441 to 0.683 in case B. As a result, it was judged that case A was more accurate than case B. Therefore, runoff and water quality modeling in minimum watershed scale that was provided data for calibration and verification was judged to be favorable in accuracy. If optimal watershed dividing and parameter optimization using PEST in HSPF with more reliable measured data are carried out, more accurate runoff and water quality modeling will be performed.

Keywords : HSPF, Watershed Scale, Runoff, Water Quality

1. 서론

최근 비점오염원의 심각성에 대한 인식이 커지고, 점오염원의 관리뿐만 아니라 비점오염원 관리의 필요성이 대두됨에 따라 두 오염원에 대한 통합적인 관리와 오염원에 의한 수질 영향에 대한 대책 마련이 요구되고 있다. 급속한 도시화 및 공업화에 따른 토지이용 변화, 교통량 증가, 인구집중 및 이동, 불투수지역의 증가 등으로 인하여 전체 오염유출량에 대한 비점오염 유출량이 점하는 비율이 증가하는 경향에 있다. 그러나, 비점오염원에 대한 관리대책은 생활하수, 공단폐수 그리고 축산과 같은 각종 산업폐수 등의 점오염원에 대한 관리대책에 비하여 충분히 진행되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 공공수역의 수질을 적절히 관리하기 위해서는 유역 내에 분포하는 비점오염 발생량의 시·공간적 분포를 우선적으로 파악함과 더불어 수역으로 유출되는 오염발생량을 양적 및 질적인 측면에서 규명하는 것이 반드시 요구되는 바이다. 공공수역의 수질관리를 위해서는 토지이용과 유역특성을 고려한 비점오염원 부하량의 합리적인 조사, 비점오염 물질 저감을 위한 관리기술의 개발, 비점오염원 관리정책의 개발, 유역의 체계적인 관리를 위한 수질모델링의 개발 등이 필요하다. 특히 하천수가 상수원으로 취수되고 있는 낙동강 수계의 경우 하천수에 대한 근본적인 수질관리를 위해서는 어느 수계보다도 비점오염원 현황파악, 토지이용 형태별 장기적인 비점오염원 유출에 관한 모니터링을 통한 장기유출에 대한 관리가 요구되고 있는 실정이다.

비점오염원의 유출은 장기적인 조사를 바탕으로 정량화하여야 하지만, 시간과 비용이 많이 소요되고, 수리·수문학적인 과정에 대한 이해의 부족으로 측정된 값에 대한 잘못된 해석을 낳을 수도 있다. 그러므로 지형, 지질, 기후 및 토양 특성, 수문학적 특성, 그리고 토지이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 고려하여 모의하는 모델링 기법이 적용되고 있다. 국내에서 대표적으로 사용되고 있는 장기유출모형은 TANK, SWAT,

PRMS, HSPF 모형 등이 있다. 이 중에서 미국 농무성(U.S. Department of Agriculture)에서 개발한 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형과 미국 환경청(U.S. Environmental Protection Agency, U.S. EPA)에서 개발한 HSPF(Hydrologic Simulation Program - Fortran) 모형이 각각의 목적에 따라 널리 적용되고 있다. 두 모형은 모두 GIS 프로그램과 연계되어 유역의 분석시간을 줄이고 다양한 정보를 손쉽게 획득할 수 있으며, 일반적으로 SWAT 모형은 농촌이나 산지에 주로 적용되고, HSPF 모형은 도시 및 농촌, 산지에 모두 적합한 혼합모형으로 알려져 있다. 본 연구에서 적용한 HSPF 모형은 강우로 인한 비점오염물질의 유출과정을 하천 내에서의 수리학적 현상, 퇴적물, 화학물질의 상호작용과 결합시켜 모의할 수 있는 유역모형과 수질모형이 결합된 형태를 취하고 있다.

본 연구에서 적용한 HSPF 모형은 유역에서의 수문해석(Brun and Band, 2000; Choi and Deal, 2008; Cho *et al.*, 2009)과 토양유실을 포함한 비점오염원의 거동분석(Hunter and Walton, 2008; Ribarova *et al.*, 2008), 수질개선과 홍수재해 방지를 위한 다양한 유역오염 관리대책 평가(Donigian *et al.*, 1997; Luo *et al.*, 2006)등에 있어서 널리 적용되고 있는 유역 모형이다. HSPF 모형에 관한 국내의 연구를 살펴보면 Jeon *et al.* (2006)은 금강수계의 만경강과 동진강 유역을 대상으로 BASINS 모형을 이용하여 HSPF 모형의 적용성을 평가하였고, 장재호 등(2006)은 BASINS /HSPF 모형을 이용하여 용담댐 유역의 오염부하량을 산정하는 연구를 수행하였으며, 황하선(2007)은 낙동강수계와 같은 대유역을 대상으로 하여 HSPF 모형의 적용성을 평가하였다. 또한 윤춘경 등(2007a)은 BASINS/ WinHSPF 모형을 적용하여 남한강 상류유역의 비점오염원 저감효율을 평가하였고, 윤춘경 등(2007b)은 소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 위하여 BASINS/WinHSPF 모형을 적용한 연구를 수행하였으며, 정광욱 등(2007)은 BASINS/HSPF 모형을 적용하여 화성유역

의 오염부하량을 정량적으로 평가하였다. Jeon *et al.* (2007)은 HSPF 모형에서 논을 모의할 수 있도록 수정된 HSPF-Paddy 모형을 개발하여 적용함으로써, 토지이용 상태에서 논이 많은 비중을 차지하는 지역에 대하여 보다 정확한 모의를 수행할 수 있도록 하였고, 신아현(2008)은 BASINS/WinHSPF 모형을 적용하여 충주댐 유역의 비점오염원 저감방안에 대한 연구를 수행하였으며, 전지홍 등(2009, 2010)은 HSPF 모형의 매개변수 보정을 위하여 개발된 PEST 모형을 이용하여 전주천 및 임하호 유역의 수문보정을 수행한 바 있다. 그러나 도시화 및 이상기후의 영향으로 유역에서의 유출특성과 오염물질 발생특성의 변화에 대응한 효율적이고 체계적인 유역의 유출 및 수질 해석을 위하여 유역과 유역간 물질의 교환 및 전달이 유역 규모에 따라 어떻게 변화하는가를 분석하고 검토하여 효과적인 유역모델링 방법이 제시되어야 할 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 HSPF 모형을 적용한 모의에서 유역의 규모가 유출 및 수질해석 결과에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하였다. 통합적 수질관리의 필요성 증대에 따라 유역 내 수문순환 및 비점오염원의 발생을 정량적으로 분석할 수 있는 HSPF 모형을 통하여 오염총량 단위유역을 각각의 소유역으로 구분하여 모의를 수행하였고, 모의를 통하여 계산된 매개변수들을 단위유역 전체에 대한 모의에 적용하여 해석 결과를 비교 및 분석하였다. 유역관리의 중요성을 인식하고 유역의 규모에 따른 정확성이 향상된 모의를 통하여, 단위유역의 관리에 대한 효율성이 증대되고, 오염총량제도의 실효성이 증가할 것으로 판단하였다. 또한, 이를 바탕으로 비점오염원에 의한 유역 내 하천 수질의 영향도를 파악함으로써, 추후 비점오염원에 대한 효과적인 관리에 도움이 될 것이며, 모니터링 기법 및 GIS기반 유역관리모델 개발, 4대강 비점오염원 최적관리기법 연구 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

II. BASINS/HSPF 모형의 이론

1. BASINS 모형

BASINS(Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources) 모형은 GIS를 기반으로 유역과 수질연구를 수행하는데 있어서 지역적, 국가적 차원에서 활용하기 위해 만든 다목적 환경 분석 시스템이다. 이 시스템은 TMDL(Total Maximum Daily Loads)의 효율적인 운영과 관리를 위해 미국 환경청에서 개발하였으며, 방대한 양의 점오염원과 비점오염원에 쉽게 접근할 수 있고 GIS의 구축과 같은 일련의 과정들을 모델 내에서 이루어지도록 하여 많은 시간과 노력을 줄일 수 있도록 하였다.

BASINS 모형은 GIS를 바탕으로 하여 QUAL2E 모형과 같은 수질해석 모형과 SWAT 모형, HSPF 모형과 같은 유출해석 모형들과 연계되어 있다. 그림 1에서 보듯이 먼저 수치고도 모형을 이용하여 하천도를 생성하고 DEM과 하천도를 이용하여 유역을 추출하고 토지이용도와 토양도를 중첩시켜서 GIS로 유역특성을 구축하도록 구성되었다.

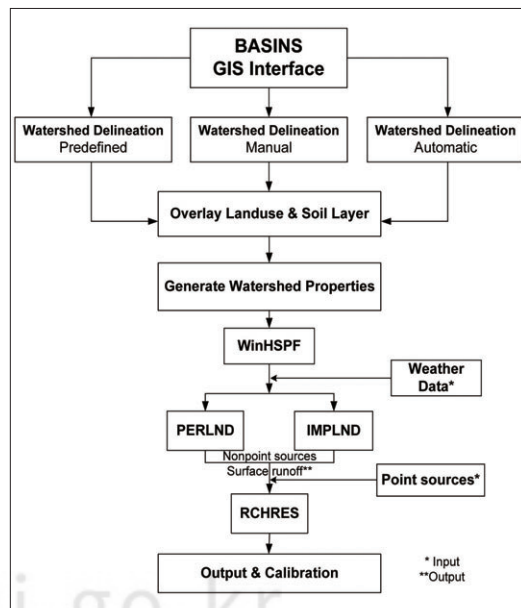


그림 1. BASINS/WinHSPF 알고리즘

2. HSPF 모형

HSPF 모형은 준분포형 장기 유출모형으로서 미국 환경청에서 1950년대에 개발된 SWM(Stanford Watershed Model) 모형에 1970년대에 수질처리 모듈이 추가되고 1980년대에 전·후처리 모듈, 알고리즘 강화, 그리고 WDM(Watershed Data Management)의 기능이 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey, USGS)과 미국 환경청에 의해 추가됨으로써 개발된 모형이다.

그림 1에서 보듯이 HSPF 모형은 투수층(PERLND)과 불투수층(IMPLND)으로 구분하여 모의되며 모의한 결과인 유출량과 비점오염원이 하천모듈(RCHRES)로 입력자료로 입력되어 수질모의를 수행하게 되는 알고리즘으로 구성되어 있으며, 각각의 모듈에서는 유출량, 토사유출, DO, 수온, BOD, NO₃, NH₄, Organic N, PO₄, Organic P, 영양염류, Plankton 등을 모의한다. 그리고 일반적으로 토지이용도의 변화 저수지 유무, 점오염원과 비점오염원 처리방법, 흐름전환의 효과를 평가하기 위

해 사용되어져 왔다. 또한 WDM Utility는 통계적 분석과 도식화를 위해 자료의 전처리와 후처리를 제공한다.

HSPF 모형은 유역의 수문과 수질을 모의하는데 있어서 강우량, 기온, 일사량, 풍속, 증발량, 운량, 이슬점 온도 등의 시계열 자료가 사용된다. 그림 2는 자연 상태에서 이러한 기상요소들이 어떠한 방식으로 수문과 수질 분석에 영향을 미치는가를 나타내고 있다. 이 자료들이 표 1의 형태로 WDM 파일에 저장되고 이렇게 저장된 파일은 BASINS 모형에서 구축된 지형자료와 함께 HSPF 모형의 입력값이 된다.

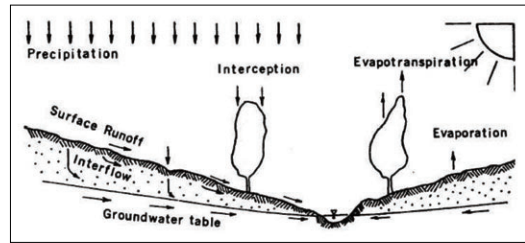


그림 2. HSPF 모형 내 물순환

표 1. HSPF 모형에 사용되는 기상자료

Parameter	DSN	Parameter Type	Unit	Method
PREC	1	hourly precipitation	in/hr	observed
EVAP	2	daily evaporation	in	computed
ATEM	3	hourly air temperature	deg F	disaggregated
WIND	4	hourly windspeed	mph	disaggregated
SOLR	5	hourly solar radiation	ly/hr	disaggregated
PEVT	6	hourly potential vaportranspiration	in/hr	disaggregated
DEWP	7	hourly dewpoint temperature	deg F	disaggregated
CLOU	8	hourly cloud cover	tenth	disaggregated

표 2. HSPF Application Module

PERLND	IMPLND	RCHRES
Water budget	Snow	Hydraulics behavior
Snow accumulation & melt	Water	Water temperature
Sediment production & removal	Solids	Inorganic sediment behaviors
Nitrogen & Phosphorous behavior	Quality	Chemical behaviors
Pesticide behavior		BOD & DO balances
Tracer chemical movement		Inorganic Nitrogen & Phosphorus balances
		Plankton population
		pH, Carbon, alkalinity

표 3. HSPF Utility Module

COPY	PLTGEN	DISPLY	DURANL	GENER	MUTSIN
Data transfer	Plot data	Tabulate, Summarize	Duration analysis	Transform, Combine time series data	Input sequential time series data

HSPF 모형은 기본적으로 3개의 Application 모듈과 5개의 Utility 모듈로 이루어져 있다. Application 모듈은 표 2에 나타난 것처럼 투수층(PERLND), 불투수층(IMPLND), 하천(RCHRES)로 나누어져 있고 각각의 모듈에는 다수의 모의 항목이 포함되어 있으며, 서로 독립적인 동시에 상호 작용하며 모의를 수행한다. 그리고 표 3에 나타난 5개의 Utility 모듈은 사용자가 직접 구축한 TSS(Time Series Store)와 WDM 파일 내에 시계열 정보를 접근, 분석, 조작을 쉽게 한다. 이러한 시간별 강우, 일별 증발량과 같은 시계열 자료는 Application 모듈과 유역특성 분석에 사용된다.

Application 모듈 중에 PERLND 모듈은 투수지역에서 발생하는 수리와 수질을 모의하는데 이는 HSPF 모형에서 가장 많은 부분을 차지한다. 먼저 투수지역의 구성요소에는 강수(rainfall and snow), 차단(interception), 저류(depression storage), 증발산(evapotranspiration), 지표수유출(surface runoff), 기저유출(interflow), 지하수 유출(groundwater flow) 등이 있으며 시간에 따른 각각의 요소들의 변화는 토지이용, 토양의 피복상태, 강우조건 등에 따른다. 기본적인 물수지 방정식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$P + SWI + GWI = ET + SWO + GWO + \Delta S \quad (1)$$

여기서, P는 강수량, SWI는 지표수 유입, SWO는 지표수 유출, GWI는 지하수 유입, GWO는 지하수 유출, ET는 증발산량, ΔS 는 저류량의 변화를 나타낸다.

IMPLND 모듈은 침투가 발생하지 않거나 아주 적은 도시지역의 수리와 수질을 모의한다. 그러나 발생하는 유출, 유사, 그리고 오염물질들은 침투지역이나 하천수로 또는 저수지의 측면 경사를 통해서 제거되기도 한다. RCHRES 모듈은 PERLND와 IMPLND에 의해서 모의된 유출량과 수질요소들을

하천수로와 저수지를 통과할 때 발생하는 현상을 모의한다. 수체내에서의 물수지 기본 방정식은 식 (2), 수질 방정식은 식 (3) 및 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$VOL - VOLS = IVOL + PRSUPY - VOLEV - ROVOL \quad (2)$$

여기서, VOL은 최종유량, VOLS는 최초유량, IVOL은 유입량, PRSUPY는 강수량, VOLEV는 증발량, ROVOL은 유출량을 나타낸다.

$$REL BOD = (BRBOD(1) + BRBOD(1) \cdot \exp(-EXPREL \cdot DOX)) \cdot SCRFAC \quad (3)$$

$$BODOX = (KBOD20(TCBOD^{TW-20})) \cdot BOD \quad (4)$$

여기서, RELBOD는 침전바닥으로부터의 BOD ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{interval}$), EXPREL은 exponential factor, DOX는 용존산소농도(mg/l), SCRFAC는 평균유속에 따른 scouring factor, BODOX는 BOD 분해에 필요한 산소량($\text{mg}/\text{l}/\text{interval}$), KBOD20는 20°C에서의 BOD분해율($/\text{interval}$), TCBOD는 온도보정계수(default값으로 1.075)를 나타낸다.

$$DODEMD = 3.22 \cdot TAMNIT + 1.11 \cdot NO_2 \equiv T \quad (5)$$

$$DENNO3 = KNO320 \cdot TC DEN^{TW-20} \cdot NO3 \quad (6)$$

$$SNUT(J) = DNUT \cdot ADPM(J) \quad (7)$$

여기서, DODEMD는 질산화로 인한 DO의 손실 ($\text{mg O}/\text{l}/\text{interval}$), TAMNIT는 NH_3 산화량($\text{mg N}/\text{l}/\text{interval}$), DENNO3는 탈질화된 NO_3 량, 20°C에서 NO_3 탈질화계수($/\text{interval}$), TC DEN은 온도보정계수를 나타낸다.

표 4와 표 5에서는 검·보정 수행시 유량과 수질 모의에 미치는 매개변수들 중 민감도분석을 통해 가장 민감도가 높은 항목을 나타내었다.

표 4. HSPF 유출량 매개변수

Parameter	Definition	Units
LZSN	Lower zone nominal storage	in
INFILT	Index to infiltration capacity	in/hr
KVARY	Variable groundwater recession	1/in
AGWRC	Groundwater recession coefficient	-
UZSN	Upper zone nominal storage	in
DEEPR	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	-
INFTW	Interflow inflow parameter	-
IRC	Interflow recession parameter	-

표 5. HSPF 수질 매개변수

Parameter	Definition	Units
KBOD20	Denitrification rates at 20°C	1/hr
KODSET	BOD settling rate	ft/hr
CVBO	Conversion from milligrams biomass to milligrams oxygen	mg/mg
CVBPC	Conversion from biomass expressed as phosphorus to carbon	moles/mol
CVBPN	Conversion from biomass expressed as nitrogen	moles/mol
KTAM20	Nitrification rates of ammonia at 20°C	1/hr
KNO220	Nitrification rates of nitrate at 20°C	1/hr
KNO320	Denitrification rates at 20°C	1/hr

III. 실제유역에 대한 HSPF 모형의 적용

1. 대상유역

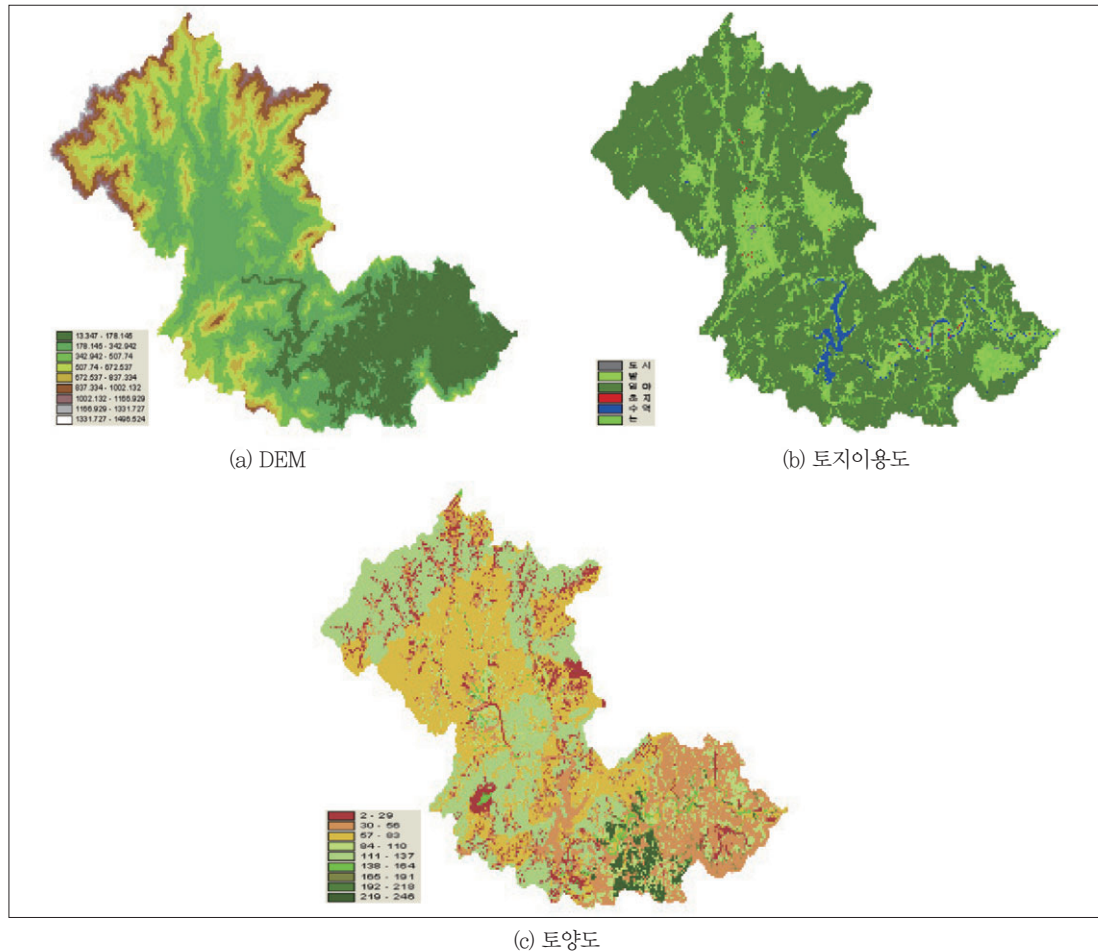
낙동강 제1지류인 황강은 동경 127° 40′ ~ 128° 22′, 북위 35° 28′ ~ 35° 55′ 에 걸쳐 낙동강유역의 서남부에 위치하고 있으며 북서쪽으로는 우리나라 4대 강인 금강유역과 접해 있다. 수원은 전라북도와 경상남도의 경계 및 금강유역과의 분수령을 이루는 덕유산 및 삼봉산에서 발원하여 남류하다가 거창군 동동지점에서 거창위과 합류한 후 동남류하면서 합천군 봉산면 상현리 지점에서 제 1지류인 가천천이 합류한다. 가천천 합류지점 약 5km 하류부에서 동류하면서 합천군 용주면 고품리 합천댐 역조정댐 지점에 이르고 이 지점 약 10km 하류부에서 합천읍의 남부를 유하한다. 이후 황강은 복동류, 동류방향으로 수차 심한 굴곡 사행류하면서 황강 제 1지류인 아천, 합천천, 금양천, 산내천 등이 차례로 합류한 후 합천군 청덕면 적포리 지점에서 낙동강 본류와 합류한다. 유역의 토지이용현황은 1,344.19km

중에서 산림면적이 997.03km으로 유역면적의 74.2%를 차지하며, 농경지 면적은 208.04km로 유역면적의 15.5%를 차지한다. 기타 도심지·초지·나대지·수역 등은 유역면적의 10.3%인 142.12km으로 유역의 대부분은 산지로 구성되어 있다.

유역의 지형적인 특성은 수문 설계 시 가장 기본이 되는 인자로서, 하천을 이해하고 유역의 수문사항을 분석하는데 있어서 중요한 요소이기 때문에 본 연구에서는 수치지도를 토대로 하여 GIS (Geographic Information System) 기법을 활용하여 유역분석을 수행하였다. 그림 3은 유출해석에 적용된 1:25000 수치지형도의 지형 레이어를 이용하여 구축된 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도, 토양도를 보여준다.

2. 모형의 적용

효율적인 유역의 관리와 점오염원 및 비점오염원의 신뢰성 높은 정량화를 위하여 보다 정확성 높은 모델링 방식이 필요하다고 사료된다. 본 연구에서는 유역수질모형으로 HSPF 모형을 선정하여 실제



(c) 토양도
그림 3. 대상유역의 현황



그림 4. 모형의 적용방식

로 황강 유역에 적용하여 유역의 유출 및 수질모델링을 실시하였다. Case A와 Case B의 두 경우로 분류하여 모의를 수행하였는데 그림 4와 같이 Case A는 각 소유역에 대한 모의를 순차적으로 수행하였

고 Case B는 전체 유역을 한번에 모의하는 방식으로 설정하였다. 구축된 모형 입력 자료들을 기반으로 2004년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지 HSPF을 이용한 유역수질모의를 수행하였다.

1) 황강 A 단위유역

앞선 그림과 같이 먼저 황강 A 단위유역부터 모의를 실시하고 모의 결과를 황강 B 단위유역의 입력자료로 사용하였다. 먼저 황강 A 단위유역의 검 · 보정은 모두 국립환경과학원의 8일 실측자료를 바탕으로 시행착오법(Trial & Error)을 통하여 수행하였으며 유출량 및 수질의 검 · 보정 결과를 그림 5에 나타내었다.

그림 5.(a)는 황강 A 단위유역의 유출량을 나타내고 그림 5.(b)는 BOD를 나타내고 있다. 유출량과 BOD 모두 갈수기를 매우 잘 따라가고 있는 것을 알 수 있으며 침투값의 경우에는 BOD가 유출량보다 약간 낮은 정확성을 보인다. 그림 5.(c)는 황강 A 단위유역의 TN을 나타내고 그림 5.(d)은 TP를 나타내

고 있다. 앞의 유출량, BOD와 마찬가지로 침투값과 갈수기를 대부분 잘 모의하고 있는 것으로 나타났지만 TP의 경우 2007년의 침투값에서 모의치와 실측치가 매우 큰 차이를 보이는 것으로 알 수 있다.

2) 황강 B 단위유역

황강 A 유역의 검·보정된 결과값을 이용하여 황

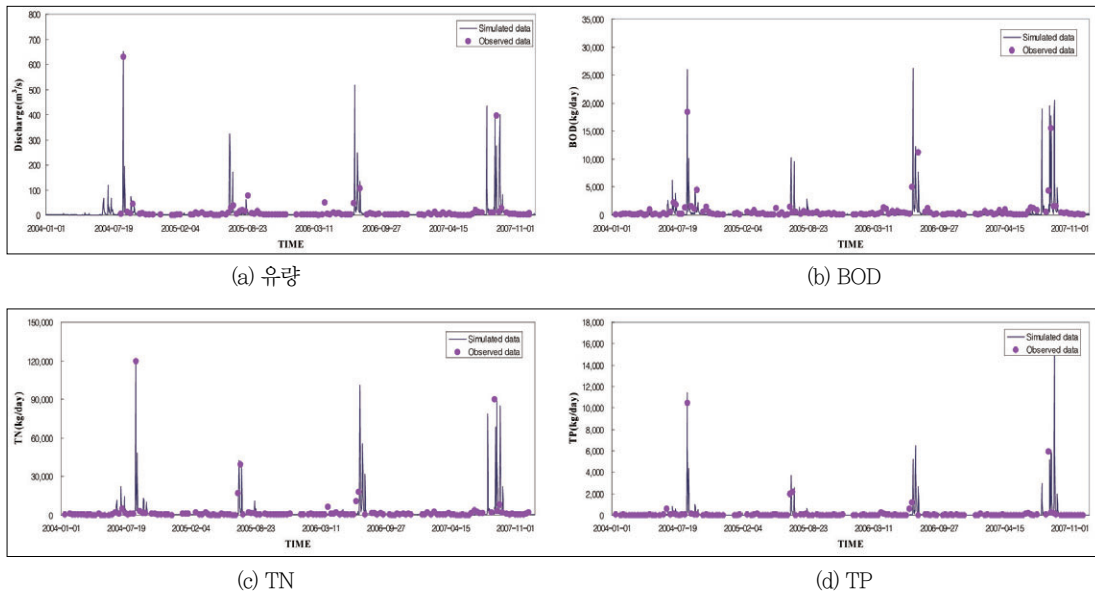


그림 5. 황강 A 유역 모의 결과

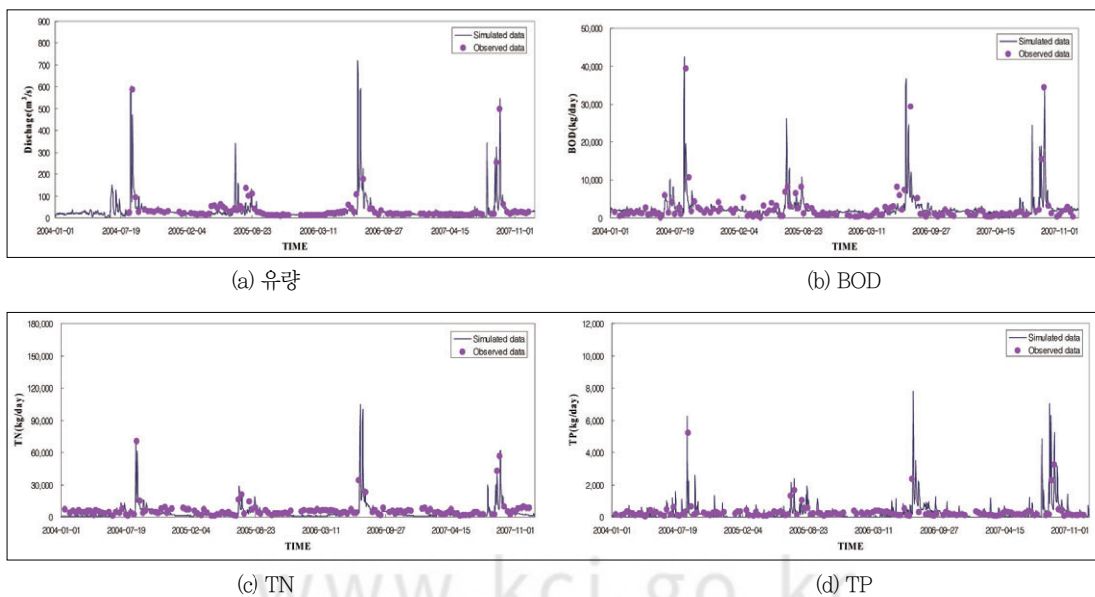


그림 6. 황강 B 유역 모의 결과

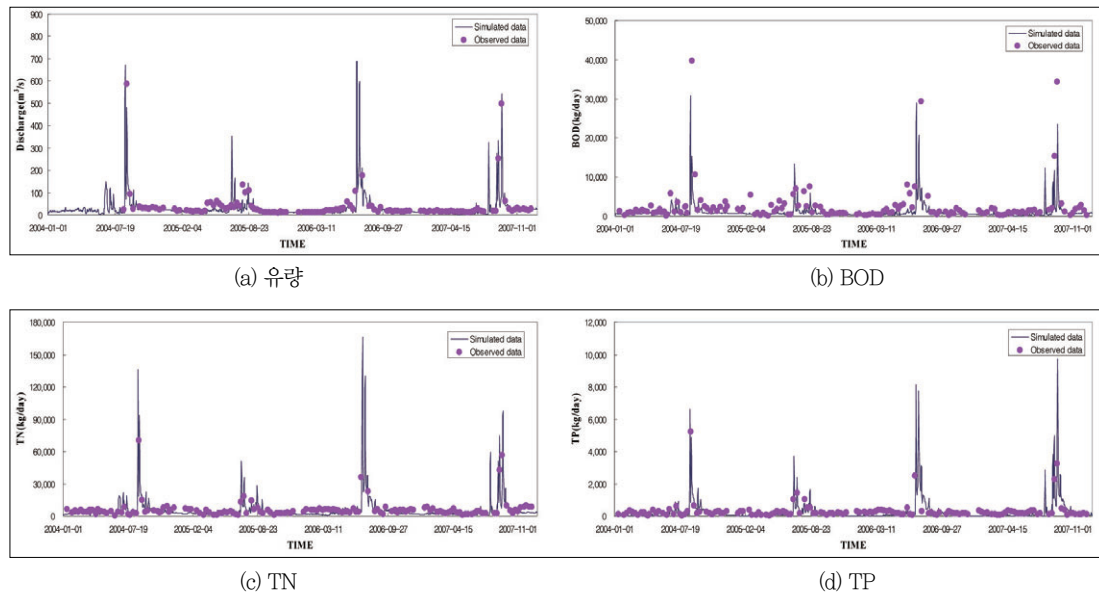


그림 7. 황강 전체 단위유역 모의 결과

강 B 유역의 입력값으로 사용하였다. 또한 황강 B 유역 말단에서는 황강 A 유역과 같은 시행착오법을 이용하여 매개변수 검보정을 실시하였다. 그림 6.(a)는 황강 B 단위유역의 유출량을 나타내고 그림 6.(b)는 BOD를 나타내고 있다. 황강 A 단위유역의 모의결과와 유사하게 첨두값이 발생하였고 실측값의 경향을 잘 반영하고 있으며, 갈수기의 유출량 모의치가 실측치를 매우 잘 따라가고 있는 것을 알 수 있다. BOD 역시 홍수기와 갈수기가 모두 황강 A 단위유역보다 실측값을 더 잘 반영하고 있다. 그림 6.(c)는 황강 B 단위유역의 TN을 나타내고 그림 6.(d)는 TP를 나타내고 있다. TN의 경우 2007년을 제외하고는 첨두값이 모두 잘 모의되었지만 갈수기에서 약간의 오차가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. TP의 경우에도 첨두값의 경향은 유사하게 나타나지만 갈수기의 부하량의 경우 TN보다 잘 따라가고 있는 것으로 보여진다.

3) 황강 전체 단위유역

황강 전체 단위유역에 대하여 국립환경과학원의 8일 실측치를 이용하여 매개변수 검·보정을 실시하였다. 그림 7.(a)는 황강 전체유역의 유출량을 나

타내고 그림 7.(b)는 BOD를 나타내고 있다. 앞서 모의를 실시한 황강 B 단위유역과 비교하여 보았을 때 홍수기 때 유출량의 첨두값은 모의치가 실측치보다 높게 나타나는 반면에 갈수기의 유출량 값에서는 전반적으로 모의치가 실측치보다 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. BOD는 전체적으로 모의치가 실측치보다 낮게 나타났다. 그림 7.(c)는 황강 전체유역의 TN을 나타내고 그림 7.(d)는 TP를 나타내고 있다. 역시나 유출량과 마찬가지로 모의치가 첨두값에서는 실측치보다 높게 나타나고 갈수기 유출량에서는 실측치보다 낮게 나타나며 그 차이는 유출량보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. TP의 경우에도 이와 유사하게 나타나고 있다.

IV. 모의결과의 비교 및 검토

모의 결과의 정확성을 정량적으로 파악하기 위하여 Case별 결과와 실측 관측치의 비교를 통하여 상관계수와 Nash-Sutcliffe 계수를 산정하였다. 그림 8에서 그림 10은 Case A와 Case B에서 수행한 모의 결과의 적합도를 판정하기 위해서 관측 자료와의 상관분포를 도시하였고 표 6에 정리하였다. 유

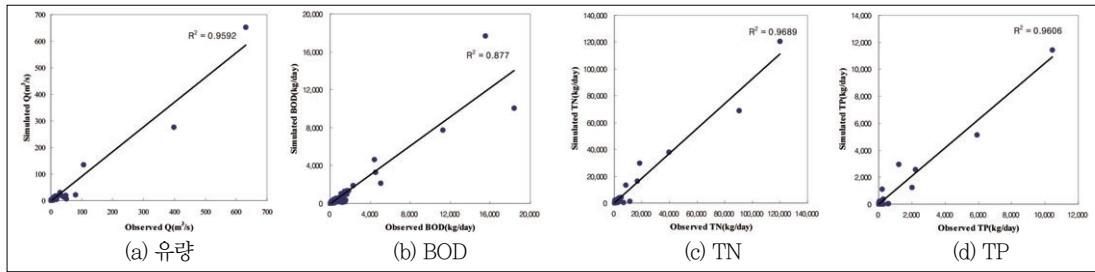


그림 8. 황강 A 유역 모의결과 산점도

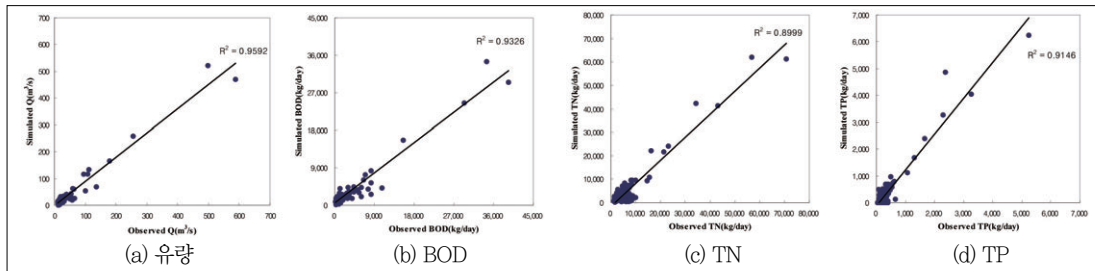


그림 9. 황강 B 유역 모의결과 산점도

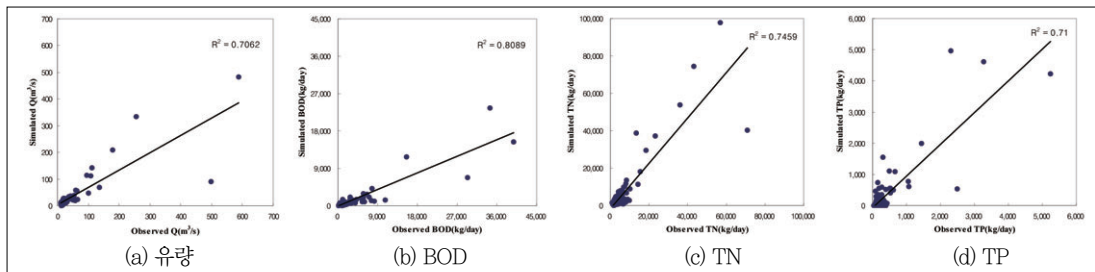


그림 10. 황강 전체 단위유역 모의결과 산점도

표 6. 모의결과의 상관계수

구분	Case A		Case B
	황강 A 유역	황강 B 유역	황강 전체단위유역
유량	0.979	0.979	0.840
BOD	0.936	0.966	0.899
TN	0.984	0.949	0.864
TP	0.980	0.956	0.843

표 7. 모의결과의 Nash-Sutcliffe 계수

구분	Case A		Case B
	황강 A 유역	황강 B 유역	황강 전체단위유역
유량	0.956	0.952	0.683
BOD	0.849	0.916	0.554
TN	0.966	0.846	0.441
TP	0.953	0.718	0.556

량의 경우 황강 A 유역과 황강 B 유역의 상관계수가 0.979로 동일하게 산정되었으나 황강 전체유역의 유량의 상관계수는 0.840으로 0.139의 차이가 발생하고 있다. BOD의 경우에는 소유역으로 분할하여 모의했을 경우 0.936, 0.966이었으나 전체유

역에서는 0.899의 값을 나타내며, TN은 Case A에서 0.984, 0.949, Case B에서 0.864로 소유역으로 분할하는 경우에 더 높은 상관계수를 보인다. TP 또한 같은 경향을 나타내며 소유역으로 분할할 경우 0.980, 0.956이며 전체유역에서는 0.843의

상관계수를 나타내었다.

표 7은 모의결과와 실측 자료를 이용하여 Nash-Sutcliffe 계수를 산정하여 나타내었다. 일반적으로 Nash-Sutcliffe 계수가 0.75 이상일 때 모의가 비교적 정확하게 수행되었다고 판단할 수 있고, 0.75와 0.36 사이의 값일 경우 모의 결과를 보완하여야 하는 것으로 알려져있다(Motovilov *et al.*, 1997). Caes A에서 산정된 Nash-Sutcliffe 계수는 0.718에서 0.966의 범위를 나타내어 Case B에서 산정된 0.441에서 0.683의 범위보다 모의가 정확하게 수행되었다고 판단된다.

상관계수와 Nash-Sutcliffe 계수의 산정에서 알 수 있듯이 유역 전체를 한 번에 모의하는 것보다 소유역으로 분할하여 모의하는 것이 오차의 누적을 줄일 수 있어 보다 정확한 유역의 유출, 수질모의가 가능한 것으로 판단된다.

모의결과의 한계점으로는 유역의 특성을 반영하기 위해서 지표유출 및 하도내 흐름과 지하수 유출입에 검·보정이 실시되어야 하나 지하수 유출입에 대한 부분이 누락되었다. 본 연구에서는 토지이용 현황과 토양도를 고려한 지하수흐름을 반영하였으나 지하수 유출입을 정량적으로 제시한 자료 획득의 한계로 지하수 부분의 검·보정을 수행할 수 없었다. 향후 연구에서는 지하수 부존량 자료를 수집하여 지하수 유출입을 정량적으로 검·보정을 수행하여 정확한 유역의 특성을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 하천의 정확한 수질해석과 유출량 예측을 통한 유역 관리의 효율을 증진시키기 위해 유역수질해석모형인 HSPF를 이용하여 오염총량 단위유역의 각각의 소유역을 순차적으로 모의한 결과와 단위유역을 전체로 모의한 결과를 비교하여 모델링 결과의 신뢰성을 높이고자 하였다. 그리고 매개변수의 검·보정을 통해 수질 모델링의 정확성 향상을 도모하였다. 최근까지 유역수질모형을 통한

비점오염원의 정량화에 관한 연구는 매우 활발히 진행되어 왔다. 그리고 모델링의 검·보정에 관해서는 국외에서 매우 활발한 연구가 진행되고 있다. 하지만 그 이전의 근본적인 문제인 모델링의 정확성에 관한 연구는 미비하였다. 기존의 유역수질모형 적용 사례를 보면 한 유역의 유출량과 수질을 예측할 때 유역의 크기에 관계없이 모두 일정하게 최종 유출지점에서의 결과를 검·보정하는 방식을 고수해왔다. 이에 본 연구에서는 유역의 수질모델링에 대한 검·보정 결과의 정확성을 위해 유역의 규모가 모델링 결과에 미치는 영향을 분석하고 그 적용성을 평가하였다.

모의 적용 결과, 소유역으로 분할한 Case A가 단위유역 전체를 모의한 Case B의 결과보다 높은 상관계수와 Nash-Sutcliffe 계수를 나타내었다. 상관계수의 경우 Case A에서 0.936~0.984의 범위를 나타내며, Case B에서 0.840~0.899의 범위로 산정되며, Nash-Sutcliffe 계수는 Case A에서 0.718~0.966의 범위를 나타내어 Case B에서 0.441~0.683의 범위로 산정되었다. 이로써 각각의 소유역별 모의가 실시된 Case A의 경우가 보다 정확한 모의 결과를 도출하는 것으로 판단되며, 검·보정에 활용할 수 있는 자료가 제공되는 최소의 유역규모로 유역수질모델링을 실시하는 것이 정확도면에서 유리할 것으로 사료된다.

향후 더욱 신뢰도 높은 측정자료와 HSPF 모형에 내장되어있는 PEST 보정기법을 적용한다면 더욱 정확한 유역수질모델링을 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 유역분할과 매개변수 최적화를 통하여 정확성 높은 비점오염원 정량화와 수질 예측이 수행될 수 있을 것이며 더 나아가 오염총량제의 수행에 효과적으로 적용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년 BK21 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 신아현, 2008, BASINS/WinHSPF를 이용한 충주댐 유역의 댐 모의 및 비점오염 저감방안 연구, 석사학위논문, 건국대학교.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 김형철, 2006, BASINS/HSPF를 이용한 용담댐 유역의 오염부하량 산정, 한국육수학회지, 39(2), 187-197.
- 전지홍, 최동혁, 김정진, 김태동, 2009, 수질학적 관점에서의 수문모델 유출량 보정 방법 평가, 수질보전 한국물환경학회지, 25(3), 432-440.
- 전지홍, 김태일, 최동혁, 임경재, 김태동, 2010, PEST를 이용한 임하로유역 HSPF 수문 보정, 수질보전 한국물환경학회지, 26(5), 802-809.
- 정광욱, 윤춘경, 장재호, 김형철, 2007, BASINS/HSPF를 이용한 화성유역 오염부하량의 정량적 평가, 한국농공학회지, 49(2), 61-74.
- 윤춘경, 신아현, 정광욱, 장재호, 2007a, BASINS/WinHSPF를 이용한 남한강 상류유역의 비점오염원 저감효율 평가, 수질보전 한국물환경학회지, 23(5), 951-960.
- 윤춘경, 한정운, 정광욱, 장재호, 2007b, 소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 위한 BASINS/WinHSPF 적용, 한국육수학회지, 40(2), 201-213.
- 황하선, 2007, 우리나라 수질오염총량관리에 있어 유역특성을 고려한 BASINS/WinHSPF의 적용성 연구-낙동강 수계를 중심으로, 박사학위논문, 건국대학교.
- Bruns, S. E. and Band, L. E., 2000, Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed, Computers, Environment and Urban Systems, 24(1), 5-22.
- Cho, J., Barone, V. A., and Mostaghimi, S., 2009, Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed, Agricultural Water Management, 96(1), 1-11.
- Choi, W. and Deal, B. M., 2008, Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA), Journal of Environmental Management, 88(4), 1119-1130.
- Donigian, Jr. A. S., Chinnaswamy, R. V., and Jobes, T. H., 1997, Conceptual Design of Multipurpose Detention Facilities for both Flood Protection and Nonpoint Source Pollution Control, Draft Final Report, Prepared for Santa Clara Valley Water District, San Jose, CA.
- Hunter, H. M. and Walton, R. S., 2008, Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia, Journal of Hydrology, 356(1-2), 131-146.
- 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: a journal of the International Association on Water Pollution Research, 53(1), 25-32.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Donigian, Jr. A. S., and Jung, K. W., 2007, Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions, Agricultural Water Management, 90(1-2), 75-86.
- Luo, B., Li, J. B., Huang, G. H., and Li, H. J., 2006, A simulation-based interval two-stage stochastic model for agricultural

- nonpoint source pollution control through land retirement, *Science of The Total Environment*, 361(1-3), 38-56.
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K. and Rohde, A., 1999,. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 98, 257-277.
- Ribarova, I., Ninov, P., and Cooper, D., 2008, Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria, *Ecological Modelling*, 211(1-2), 241-246.

최종원고채택 11. 07. 30