



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 2월
석사학위 논문

상수원 보호구역에서의
유역모형(HSPF) 구축과
자동검보정 기능 적용에 관한 연구

조선대학교 대학원

환경공학과

김 태 국

상수원 보호구역에서의
유역모형(HSPF) 구축과
자동검보정 기능 적용에 관한 연구

A Study on the HSPF Watershed Model and
Autocalibration in Water Protection Areas

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

환경공학과

김 태 국

상수원 보호구역에서의
유역모형(HSPF) 구축과
자동검보정 기능 적용에 관한 연구

지도교수 이 성 기

이 논문을 환경공학 석사학위 신청논문으로 제출함
2016년 10월

조선대학교 대학원

환경공학과

김 태 국

김태국의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 신 대 윤 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 경 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 성 기 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

목 차

I . 서론	1
II . 이론적 고찰	3
1. 모형의 종류와 특성	3
2. 모형의 선정	7
1) 모형선정	7
2) HSPF 모형	7
3) 자동 검보정 프로그램(PEST)	14
3. 국내외 연구사례	16
III . 연구방법	18
1. 연구의 방법	18
2. 대상 유역 현황	19
1) 대상유역의 개황	19
3. 유량 및 수질 모니터링 조사	24
1) 조사지점 및 시기	24
2) 조사방법 및 항목	25
4. 유역(HSPF)모형 구축	26
1) 입력자료 구축	27
2) 유역모형 검보정	34
3) 자동 검보정 프로그램(PEST) 구축	35

IV. 결과 및 고찰	38
1. 유량 및 수질 모니터링 조사결과	38
1) 유입하천 조사결과	38
2. 유역모형(HSPF) 검보정 결과	45
1) 유량 검보정 결과	45
2) 수질 검보정 결과	49
3. PEST 결과	56
1) 유량 검보정 결과	56
2) 수질 검보정 결과	60
V. 결론	68
【참고문헌】	69

표 목 차

Table 2.1 Characteristics of Non-point source Models	3
Table 2.2 Case study research of HSPF model	16
Table 2.3 Case study research of HSPF-PEST model	17
Table 3.1 Buan-Dam stream flow status	21
Table 3.2 Information of Buan-Dam	22
Table 3.3 Input data model basin	26
Table 3.4 accreditation scope of model results correction	33
Table 4.1 Hydrologic simulation and calculation parameters for the range ..	45
Table 4.2 Adjustment range of parameters related to floodgates	46
Table 4.3 Flow Calibration results (I-1)	47
Table 4.4 Flow Calibration results (I-2)	48
Table 4.5 Scope and application of the parameter values	49
Table 4.6 Water correction results (I-1)	50
Table 4.7 Water Calibration results (I-2)	53
Table 4.8 I-1 PEST Calibration results (Flow)	56
Table 4.9 Flow parameters for PEST Calibration (I-1)	57
Table 4.10 I-2 PEST Calibration results (Flow)	58
Table 4.11 Flow parameters for PEST Calibration (I-2)	59
Table 4.12 PEST Water calibration results (I-1)	60
Table 4.13 Water parameters for PEST Calibration (I-1)	63
Table 4.14 PEST Water calibration results (I-2)	64
Table 4.15 Water parameters for PEST Calibration (I-2)	67

그림 목 차

<Fig. 2.1> Overview of HSPF structure	8
<Fig. 2.2> Structure of HSPF module	9
<Fig. 2.3> PERLND module Summary	10
<Fig. 2.4> Material Cycle of Impermeable layer	11
<Fig. 2.5> Process of Impermeable layer	12
<Fig. 2.6> RCHRES module Summary	13
<Fig. 2.7> Material Cycle of RCHRES	13
<Fig. 2.8> HSPF-PEST Process	15
<Fig. 3.1> Reserch Flow	18
<Fig. 3.2> Site of Buan-Dam basin	20
<Fig. 3.3> Status on Floodgate of Buan-Dam	23
<Fig. 3.4> Survey site of Buan-Dam basins	24
<Fig. 3.5> Survey site of Buan-Dam basin Inflow	25
<Fig. 3.6> River and Catchment basin of Buan-Dam	27
<Fig. 3.7> DME Build Results	28
<Fig. 3.8> Watershed the Segmentation Process	29
<Fig. 3.9> Land use Data Input Process	30
<Fig. 3.10> Meteorological Data Input Process	31
<Fig. 3.11> HSPF Build Results	32
<Fig. 3.12> Relationship between PEST/TSPROC and HSPF Models	34
<Fig. 4.1> Monthly Flow and Water Quality (I-1)	39
<Fig. 4.2> Monthly Flow and Water Quality (I-2)	40
<Fig. 4.3> Rainfall, Survey Results (pH, DO, Temperature)	42
<Fig. 4.4> Rainfall, Survey Results (BOD5, CODMn)	42
<Fig. 4.5> Rainfall, Survey Results (Turbidity, SS)	43
<Fig. 4.6> Rainfall, Survey Results (T-N, NO3-N)	43

<Fig. 4.7> Rainfall, Survey Results (NH ₃ -N, NO ₂ -N)	44
<Fig. 4.8> Rainfall, Survey Results (T-P, PO ₄ -P)	44
<Fig. 4.9> Flow Calibration Results (I-1)	47
<Fig. 4.10> Flow Calibration Results (I-2)	48
<Fig. 4.11> Water Calibration Results (WT, DO, BOD)(I-1)	51
<Fig. 4.12> Water Calibration Results (T-N, T-P)(I-1)	52
<Fig. 4.13> Water Calibration Results (WT, DO, BOD)(I-2)	54
<Fig. 4.14> Water Calibration Results (T-N, T-P)(I-2)	55
<Fig. 4.15> I-1 PEST Calibration Results (Flow)	56
<Fig. 4.16> I-2 PEST Calibration Results (Flow)	58
<Fig. 4.17> PEST Water Calibration Results (WT, DO, BOD)(I-1)	61
<Fig. 4.18> PEST Water Calibration Results (T-N, T-P)(I-1)	62
<Fig. 4.19> PEST Water Calibration Results (WT, DO, BOD)(I-2)	65
<Fig. 4.20> PEST Water Calibration Results (T-N, T-P)(I-2)	66

ABSTRACT

A Study on the HSPF Watershed Model and Autocalibration in Water Protection Areas

Kim Tae Kook

Advisor : Prof. Lee Sung Ki, Ph.D.

Department of Environmental Engineering
Graduate School of Chosun University

According to the National Plan for 4-River Water Management by the government, the pollutant load of nonpoint pollutant sources out of the entire water pollutant sources is estimated to reach approximately 22~37%. The influx of these pollutants into dams, lakes, rivers, and groundwater will pose a great threat to humans and the ecosystem. In particular, the flow of such water pollutants into tap water, which is the major source of drinking water, is a tremendously grave issue. In order to address this problem, water quality prediction techniques for dams, reservoirs, and rivers are recently being introduced for the prediction and preventive water quality management. Further, active application of technologies for water quality prediction around watersheds is in practice.

In the water quality adjustment, the % difference of the both points in terms of water temperature, DO, BOD, T-N, and T-P was 15% or lower. The adjustment was performed using the hourly measured data with the watershed model (HSPF) in the tap water resource protection area. All were very good, and it is thought that the watershed model can be applied.

Discharge and water quality were calibrated and validated using the PEST. The efficiency was assessed based on % Difference at a relatively similar level as the simulated results. The majority of them were rated as very good or Good.

Therefore, the application of the PEST is considered to be possible.

The model efficiency results of the HSPF turned out to reflect the discharge and water quality well as both of them were rated as very good or good. However, nonpoint pollutant sources require a continued monitoring. Therefore, improvement of model reliability through much more monitoring data and database is required for the management of nonpoint pollutant sources.

I. 서론

정부의 4대강 비점오염원관리 종합대책에 따르면, 비점오염원이 4대강 오염원의 22 ~ 37 %이상을 차지하며, 하수처리장 보급, 배출기준 강화 등으로 점오염물질은 계속 감소하는 추세이며, 산림, 도시·농경지, 도로 등에서 발생하는 비점오염물질은 계속 증가 할 것으로 추정된다(환경부, 2006).

비점오염물질은 유역의 토지이용과 강우유출수의 유출특성에 따라 조성이 다양하며 강우시 지표면에 축적되어 있던 각종 오염물질들이 유출수에 씻겨 단시간 내에 수체로 유입되는 특성을 나타낸다(권헌각, 2016).

이러한 오염원이 댐, 호소, 하천, 지하수 등에 유입되면 인체 및 생태계에 다양한 위협을 초래하게 된다. 특히, 우리나라의 경우 상수원수의 취수는 하천 표류수에 크게 의존하고 있어 원수수질오염이 수돗물의 수질에 바로 영향을 주는 등 수질사고에 취약한 구조적 특징을 지니고 있다(김진해, 2010).

한편 국내의 상수원 보호구역은 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 예측, 예방적 수질관리를 위한 하천, 저수지 및 댐의 수질예측 기술이 도입되고 있으며, 유역을 중심으로 한 유역-하천-저수지의 유역환경 변화를 감시하고 변화를 분석하여, 수질을 예측하는 기술 활용이 활발히 이루어지고 있으며, 그러나 유역모형의 구조는 매우 복잡하며 모형의 구동을 위한 입력자료 및 매개변수 인자가 방대하여 어려운 점이 있다. 특히, 모형의 각종 매개변수 인자 값은 모형의 검보정 과정에서 많은 시간과 노력이 필요하며 그 유역 특성에 맞게 수정하여야 하며, 검보정 정확도를 높이기 위해서는 여러해 동안의 자료가 요구된다(김진원, 2014).

따라서 유역모형의 구축시 모형의 정확도를 제고하기 위해 과학적이고 신뢰할수 있는 검보정 기술을 적용하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 이러한 유역수질모형의 모델링 과정에서 자동 검보정 프로그램(PEST; Model-Independent Parameter Estimation)을 적용할 경우 정확하고 신뢰성이 높은 비점오염원 정량화와 수질예측이 가능하며, 더 나아가 수질오염총량제도의 수행에 효과적이라는 결과가 보고된바 있다.(박태원, 2012).

본 연구에서는 상수원보호구역의 유역모형 구축과 자동 검보정 프로그램에 대하여 조사하였고, 이를 위해 대상유역에서 실제 강우시 모니터링한 실측자료를 이용하여 시간단위별로 모형의 검보정 방법에 대하여 적용하였으며, 정확도를 높이고 불확실성을 낮추기 위해 자동 검보정 프로그램을 이용하여 좀 더 과학적이고 신뢰성 있는 검보정 방법을 모색하였다.

II. 이론적 고찰

1. 모형의 종류와 특성

유역모형은 유역에서 발생, 순환되는 수문 현상을 시뮬레이션 한 후 오염물의 축적과 유출, 기타 수질변화 요인을 고려하여 오염물의 발생과 이동과정을 수문학적인 상호작용에 의해 모의 할 수 있다. 유역모형은 수리·수문모형이나 수질모형과 같이 1970년대 미국을 중심으로 개발되기 시작하였는데, 모형의 종류에 따라 입력자료와 예측결과의 차이가 많다. Table 2.1는 각 유역모형별 개발기관, 강우형태, 특성에 대해 나타내었다(환경부, 2007).

Table 2.1 Characteristics of Non-point Source Models

모형명	개발기관	강우형태	특성
AGNPS	USDA	단일, 연속	COD, 영양물질, 토사, 농약 등에 대해 예측 가능, 다양한 토지 유형에 대해 적용가능
ANSWERS	Purdue University	단일	토사 및 영양물질 유출 예측, 농경지의 유출현상을 예측, 토지 관리 및 보전정책에 대한 효과를 평가,
DR3M-QUAL	USGS	단일, 연속	토사, 질소와 인, 금속 그리고 유기물질에 대해 예측 가능, 처리시설, 저수력, 하수시스템에 대한 분석 가능
STORM	HEC	연속	BOD, 질소, 부유물질, 침강성 고형물, 총 분변성 대장균에 대해 예측 가능, 저수력, 처리시설에 대한 분석 가능
SWMM	EPA	연속	토사를 포함하여 10가지의 오염물질에 대해 예측 가능하며, 처리 시설, 저수력, 하수시스템에 대한 분석 가능
SWRRBWQ	USGS	연속	질소, 인, 토사 그리고 농약에 대해 예측 가능
CREAMS	USGS	단일, 연속	농약과 비료에 대한 화학물질모형이 있으며, 영양물질 모형은 농경지에서의 질소와 인의 순환 및 유실을 추정가능
HSPF	EPA	단일, 연속	농약, 영양물질 및 사용자 정의 물질에 대해 예측 가능, 수체내 부에서의 수질까지 예측 가능

AGNPS(Agricultural Non-Point Source Pollution Model)는 Minnesota Pollution Control Agency와 U.S. SCS의 협조로 U.S. Agricultural Research Service(ARS)에서 개발한 유역모형이다. 이모형은 농경지 유역으로부터 배출되는 비점오염원을 모의하기 위해 개발되었고, 다양한 유역관리에 이용될 수 있다.

ANSWERS(Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation)은 미국 Purdue 대학교에서 개발한 모형이다. 강우 현상을 토대로 농경지의 유출현상을 예측하는 모형이며, 유역의 토지이용, 관리 및 보전정책에 대한 효과를 평가하는데 사용될 수 있다.

DR3M(Distributed Roution Rainfall-Runoff Model)은 USGS에 의해 개발된 유역모형으로, 도시 지역에서의 표면유출수와 오염부하에 대해 시뮬레이션이 가능하다. 이모형은 수질에 영향을 미칠 수 있는 불투수지역, 투수지역에서 강우자료를 이용하여 자연하천이나 인공수로를 통해 일어나는 유출의 흐름을 지역, 강우분포 등을 고려하여 적용하며, 유기물질, 질소와 인, 토사, 중금속에 대해 예측이 가능하다.

STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)은 미육군공병단 Hydrologic Engineering Center에 의해 1975년에 개발된 모형으로서, 도시 유역에서 발생하는 유출과정을 Time-series 시뮬레이션이 가능하며, 이모형은 준동적 모형으로서, 합리식을 사용하여 수문학적 과정을 적용한다.

SWMM(Storm Water Management Model)은 미국연방환경보호청(USEPA)에 의해 개발된 모형으로, 도시 유역에서 강우에 의해 발생하는 유량과 수질을 시뮬레이션 할 수 있다. SWMM는 부유물질을 포함하여 10가지의 오염물질에 대해서만 적용하며, 시뮬레이션을 위해 강우강도, 토지이용도, 토양의 특성, 수리학적 인자 등이 입력자료로 요구된다.

SWRRBWQ(Simulation for Water Resources in Rular Basins-Water Quality)는 미농무성(USDOA)에 의해 개발된 모형이며, 농지 유역에서의 저수지의 저장고, 수문과정, 토사유출, 농약의 흐름 등을 적용 할 수 있다. 토지이용도와 기후, 토양의 특성 및 지형 등의 차이를 설명하기 위하여 유역은 최대 10개의 유역으로 한다.

CREAMS(Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System)은 미농무성에 의해 농촌 지역의 최적 관리 기법을 위해 개발되었으며, 이모형은 유출량, 침투유량, 투과, 증발산량, 토양 함수량 등에 대해 일단위로 적용하며, 모형 내에서 고려되는 수문 현상으로는 지표 유출, 침투, 증발산 등이 포함되며, 강우 에너지와 지표 유출에 의해 토양 침식이 발생하고 유출수에 용해되거나 토양입자에 부착되어 영양물질이 이동하는 것으로 해석한다.

HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran)는 강우로 인한 비점오염물질의 유출과정을 하천내 수리와 퇴적물-화학물질 상호작용과 결합시켜 적용 할 수 있는 하천모형과 유역모형이 결합된 형태이며, HSPF는 1차원적 해석을 통해 유역의 수문학적 특성과 수질을 동시에 적용 할 수 있다. 적용이 가능한 수질 항목은 보존성물질, 수온, DO, BOD, 무기성 토사, 무기성질소, 무기성인, 플랑크톤, 유기성 질소, 유기인, 유기탄소, pH, 무기성 탄소, 알칼리도이다. 모형 적용 결과, 강우로 인한 유출 유량과 토사 유출량, 영양물질과 농약 농도의 시간적 변화, 유역의 어떤 지점에서의 수질과 수량의 시간적 변화 등을 얻을 수 있다(환경부, 2007).

2. 모형의 선정

1) 모형선정

비점오염원의 유출해석에는 여러 가지 모형이 이용되고 있으나 국내에서 많이 사용되고 있는 모형은 SWMM, SWAT, HSPF등이며, SWMM모형은 경우 월, 계절, 연별 변화 특성을 고려할 수 있고, 유량, 유사량 및 BOD, 질소와 인 등 영양물질에 대해 일단위의 시간 단위로 모의가 가능하며 도시지역의 유출해석에 많이 이용되고 있다. SWAT은 월, 계절, 연별 변화 특성을 고려할 수 있고, 질소와 인 등 두 가지 영양물질에 대해 모의가 가능하고, 농경지역이나 산림지역의 유출해석에 많이 이용되고 있다. HSPF는 월, 계절, 연별 변화 특성을 고려할 수 있고, 유량, 유사량 및 BOD, 질소와 인 등 영양물질에 대해 일 단위와 시간단위로 모의가 가능하고 농경지, 산림지역이나, 도시지역 등 복합적인 지역의 유출해석에 많이 이용되고 있다(수자원공사, 2014).

본 연구에서는 조사대상유역이 산림과 도시의 복합적인 지역의 이유로 HSPF모형을 적용하기로 하였다.

2) HSPF 모형

(1) 개요

HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran) 모형은 1960년대 초반 스탠포드 유역이었으며, 1970년대 후반에는 소프트웨어 공학 설계를 이용하여 몇 개의 모형을 연계하여 포트란(Fortran) 프로그램으로 개발하였다. 1980년대에는 전후처리 소프트웨어가 추가 되었고, USGS의 WDM(Watershed Data Management) 시스템이 USGS와 USEPA에 의해 공동 개발되었다. 1990년대에는 HSPF 모형의 매개변수를 추정하모형(Standford Watershed Model)으로 처음 개발되었다. 1970년대에는 수질 기작이 추가되는 전문가 프로그램인 HSPEXP, 입출력 관리 시스템인 WDMutil(USEPA, 2001), 사용자 편의 시스템을 이용하여 모형을 손쉽게 구동하도록 개발된 HSPF의 호환 모형인 Win HSPF와 HSPF 모형의 결과를 시각적으로 보여 주기 위한 GenScn 모형 등이 개발되었다.

HSPF 모형은 WDM(Watershed Data Management)을 이용하여 입출력 자료의 전후처리, 통계분석, 그래픽 지원 등을 제공하고 있으며. 시간 간격은 1분부터 수백년까지의 기간에 대한 모의가 가능하며, 지금까지 수 ha 크기의 시험포장단위에서 160,000km²의 Chesapeake만에 이르기까지 다양한 유역에 적용되었다.

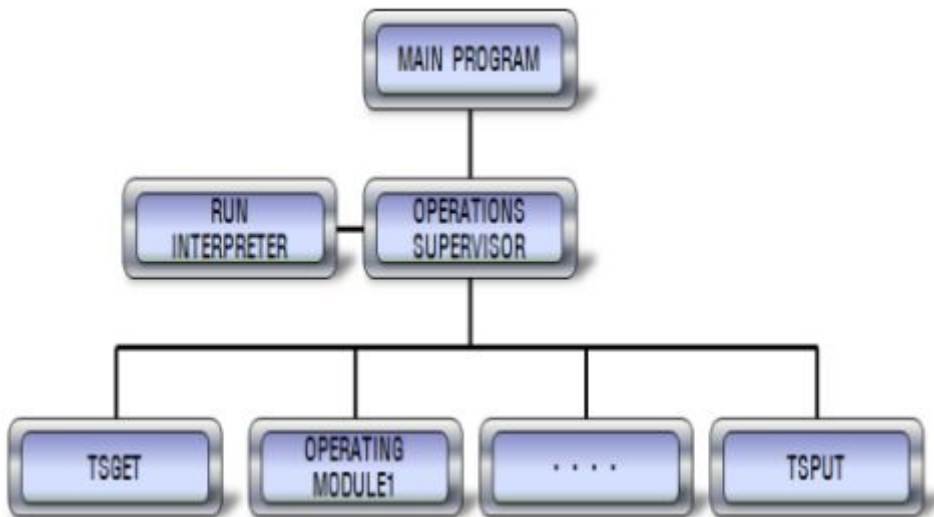
또한, HSPF는 Time-Series를 기본으로 하여 자료를 직접적으로 접근하기 때문에 많은 양의 파일을 입력 및 수정이 편리하며, 모형이 단일화되었기 때문에 조작이 간단하며, 시스템은 Top-Down Programming 기술에 의해 개발되었기 때문에 모형을 수정하거나 새로운 모듈을 추가하는데 상대적으로 용이하다.

HSPF모형은 모형의 적용에 필요한 많은 양의 자료와 노력을 최소화 되도록 개발되어 왔으며, HSPF는 광범위한 수문·수질과정을 장기 모의가 가능하도록 일련의 구조화된 모듈로 구성되어 있다. 복잡한 모형일수록 자료 관리에 많은 노력이 요구되나 HSPF는 자료를 직접적으로 접근할 수 있는 Time Series Management System에 근접하도록 개발되었다. 모의 모듈은 Time-Series가 저장되어 있는 파일로부터 입력을 받으며 모의 결과를 다시 Time-Series에 저장하여 자료 관리에 있어 시간과 노력을 최소화 할 수 있다.

또한, HSPF모형은 유역내의 토지이용에 따라 특정 오염물질의 비점오염부하를 계산하며, 강우에 따른 물의 흐름을 하천의 수질오염모의와 연결시키며, 광범위한 유역조건에 적용이 가능하고, 모형을 효과적으로 사용할 수 있도록 HSPFEXP, WDMutil, METCMP, IOWDM 등의 보조프로그램이 개발되어 있다. 그러나, 시간별 기온, 풍속, 강수량, 증발량등의 많은 양의 자료를 필요로 하며, 비분산형 모형으로 소유역에 대해 평균적인 매개변수 값을 사용하며, 하천의 흐름을 한 방향으로 가정하여 수리학적 한계와 하천 바닥의 조류나 플랑크톤 같은 조류에 관계된 수질 모의에 한계가 있다(Donigian, 2000).

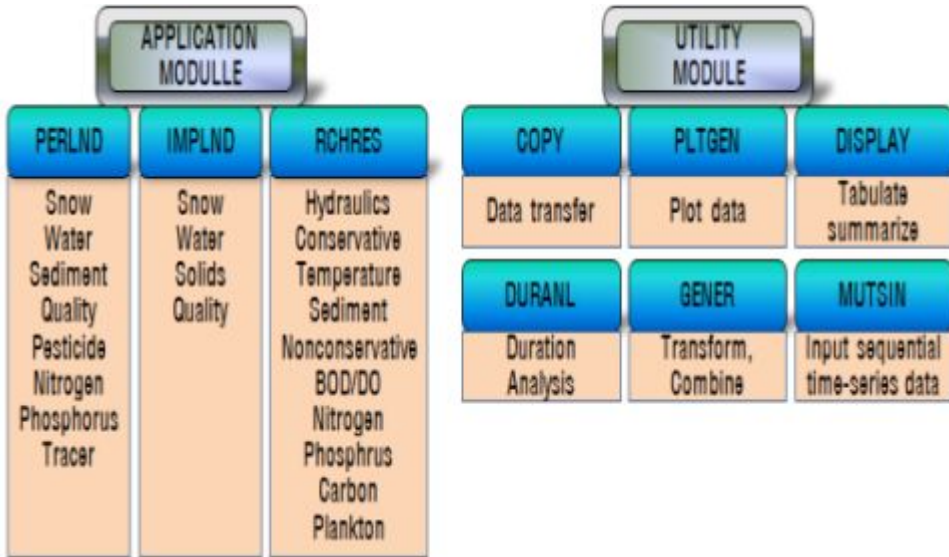
(2) 모형의 구조

HSPF모형의 구조는 <Fig. 2.1>과 같으며, 주 모형 아래 Run Interpreter, Operations Supervisor, Run Interpreter, Operating Module, Time Series Management System과 같은 부 모형을 가지고 있으며, Run Interpreter는 입력파일(UCI; Users Control Input)을 읽고 해석할 수 있는 부프로그램이며, 일련의 작동과 관련된 시스템을 지시하는 내부정보를 만들어 지시파일을 생성해주며, 초기상태와 각각의 작동에 필요한 인자를 적절한 파일의 형태로 저장해주는 역할을 하며, Operations Supervisor는 Run Interpreter가 작성한 내부 정보에 따라 적절한 Application 혹은 Utility Module을 적용하여 실행하는 서브루틴이다. Operating Module은 application module 혹은 utility module을 말하며 작동을 실행하는 모듈로서 매시간 하나의 모듈이 불러들여 internal scratch pad(INS PAN)에 따라 실행되어지며, Operations Supervisor에 의해 적절한 모듈이 불러진다. Time-Series Management System는 TSGET와 TSPUT로 구성되어 있으며, TSGET(get time series)는 모형에 필요한 기상자료 등의 입력자료를 읽어 들이고 실행결과를 사용자가 지정한 시간 간격으로 TSPUT(put time series)에 입력된다(환경부, 2010).



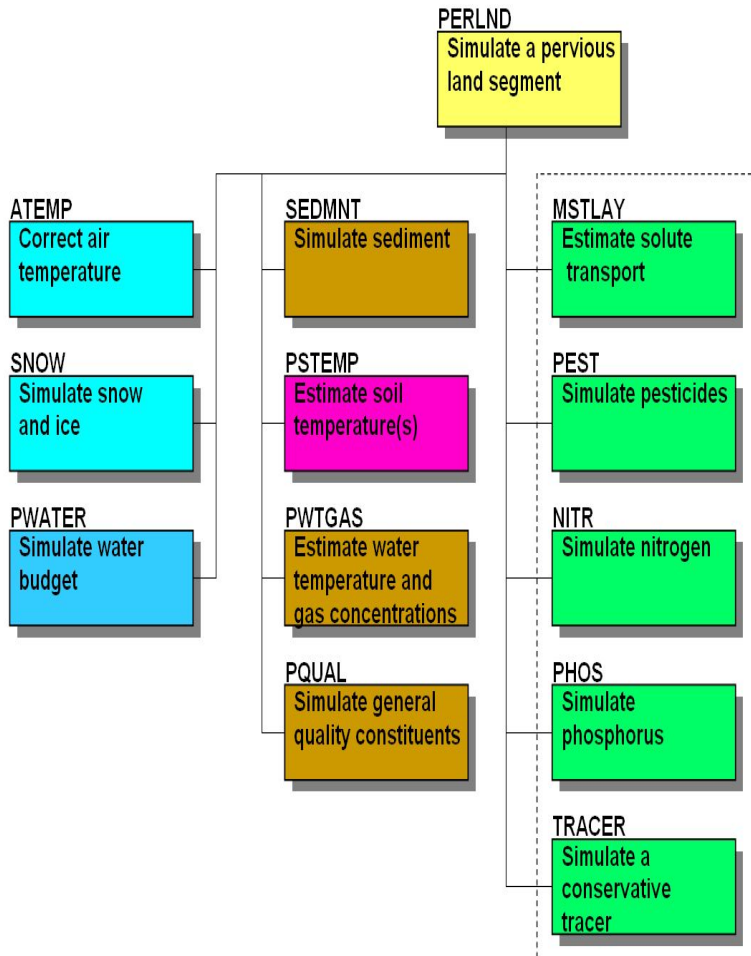
<Fig. 2.1> Overview of HSPF structure

<Fig. 2.2>는 Application 모듈에 대한 설명이다. Application 모듈은 투수지형 (pervious land)에서의 수문 및 수질을 모의하는 PERLND 모듈과 불투수지형 (impervious land)의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND 모듈, 수체내의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES 모듈로 나누어져 있으며, 각각의 모듈에는 물의 흐름에 관계된 부분과, 토사유출, 영양염류 등 수질에 관계되는 부분이 섹션(Section)으로 구분된다(환경부, 2012).



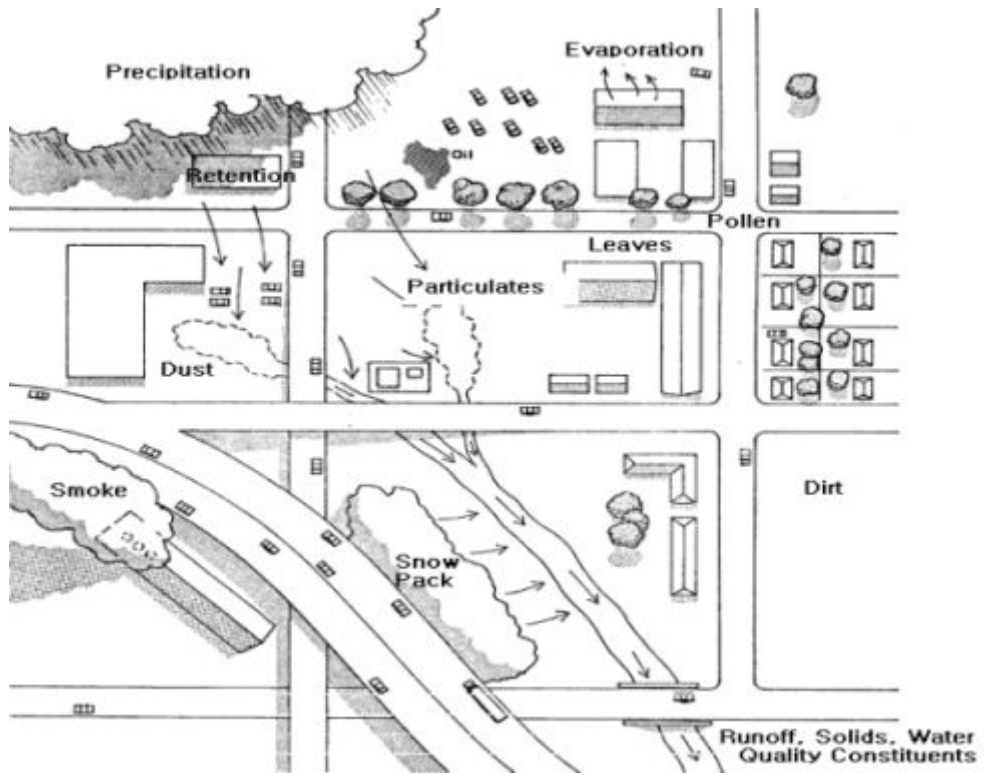
<Fig. 2.2> Structure of HSPF module

<Fig. 2.3>은 PERLND 모듈의 구성도이며, 모의될 유역은 몇 개의 카테고리를 기준으로 분할하여 모의되며 이러한 경계는 사용자의 정의에 따라 분류되지만, 일반적으로 유사한 수리학적 특성을 기준으로 정의된다. 유역모형에서 물이나 침전물, 수질오염물질은 유역에서 발생하여 하류의 유역으로 흘러가며 하천이나 호소로 유입된다. 물수지에 영향을 줄 정도의 침투가 일어나는 토지를 투수층으로 간주한다. PERLND에서의 주요한 모듈은 융설을 모의하는 SNOW, 지표면에서의 토양유실을 모의하는 SEDMNT, 물 수지를 모의하는 PWATER, 수질을 모의하는 PQUAL이 있으며, 그 외의 다른 항목은 보조적인 기능을 수행한다(환경부, 2012).

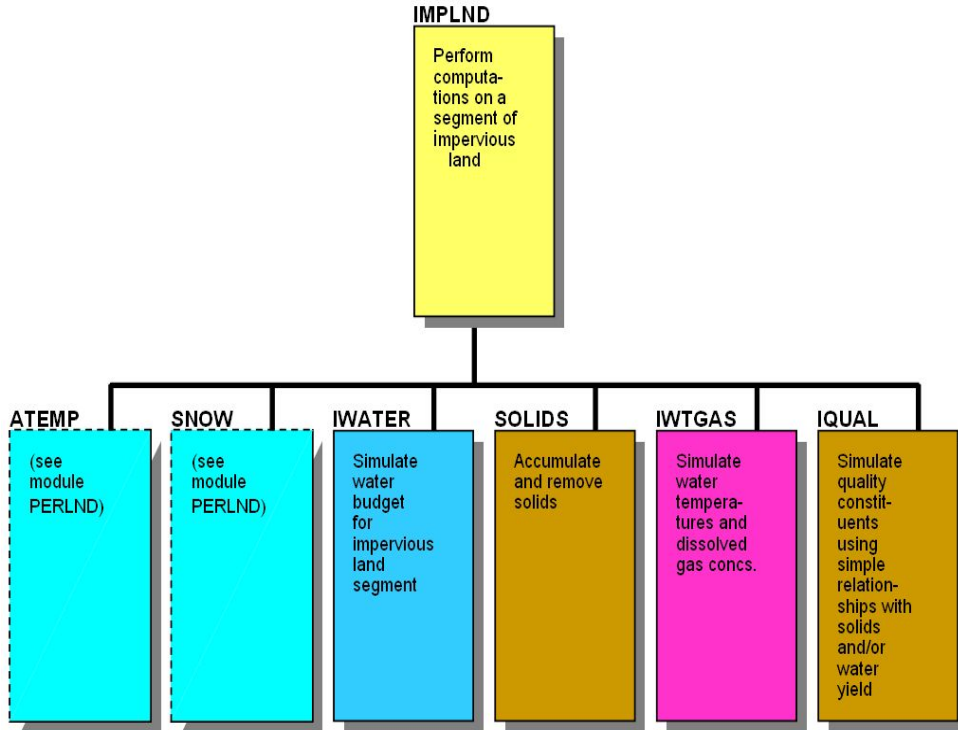


<Fig. 2.3> PERLND module Summary

불투수층에서의 침투는 매우 작거나 일어나지 않는다. 불투수층에서의 물질순환과정은 <fig. 2.4>와 같으며, 응설은 축적되고 용해되며 물은 저장되거나 증발된다. 오염물질들은 지표면에 축적되고 제거된다. IMPLND모듈의 개요도는 <Fig. 2.5>와 같으며 왼쪽에서 오른쪽으로 실행된다. 대부분의 모듈들은 PERLND의 모듈과 유사하며, SNOW와 ATEMP 모듈은 투수층과 불투수층에서 모두 사용된다. IWATER는 PERLND모듈의 PWATER와 상응하며, SOLID는 SEDMNT, IWTGAS는 PWTGAS, IQUAL은 PQUAL과 상응한다. IMPLND는 침투와 그로 인한 지표아래의 유출을 포함하지 않기 때문에 PERLND보다는 간단하다(환경부, 2012).

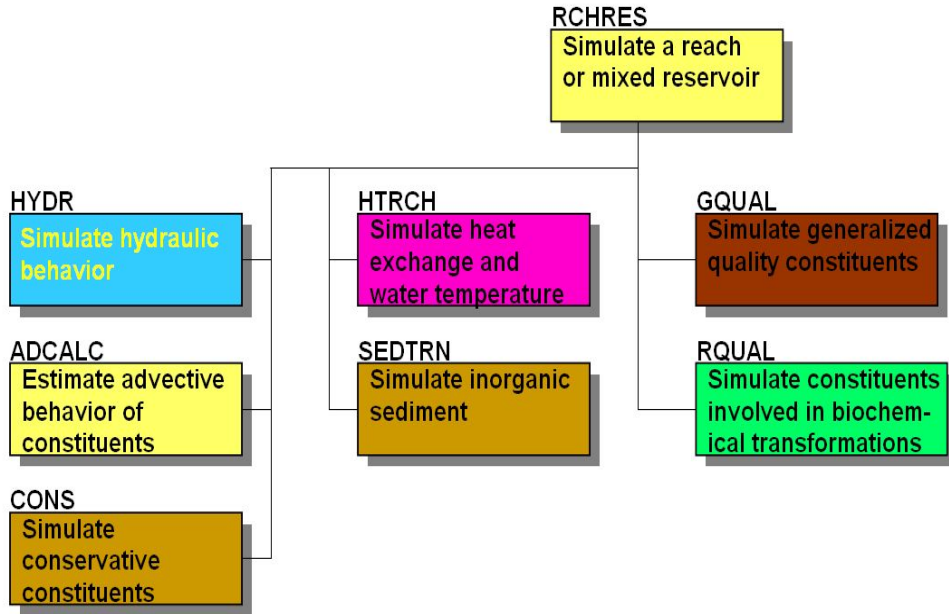


<Fig. 2.4> Material Cycle of Impermeable layer

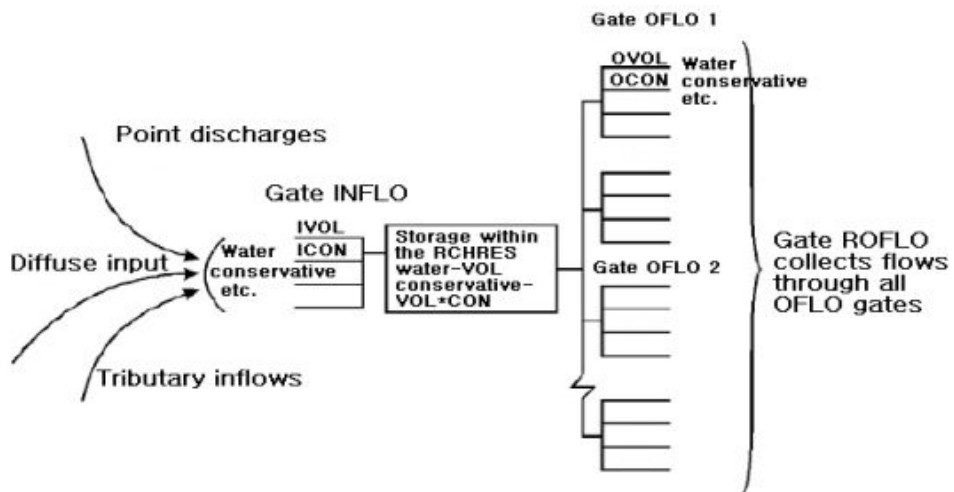


<Fig. 2.5> Process of Impermeable Layer

RCHRES는 수로나 완전혼합으로 가정할 수 있는 호소에서 일어나는 과정을 모의한다 <Fig. 2.6>. RCHRES에서의 물의 흐름은 단일방향의 흐름으로 가정하고 RCHRES를 통한 물질의 유출입은 <Fig. 2.7>과 같다. 오염원이나 상류 RCHRES에서의 물과 오염물질들은 하류 RCHRES의 하나의 유입구로 유입되며 RCHRES에서의 유출은 여러개의 유출구 중 하나의 유출구를 통해 유출된다(환경부, 2012).



<Fig. 2.6> RCHRES module Summary



<Fig. 2.7> Material Cycle of RCHRES

2) 자동 검보정 프로그램(PEST)

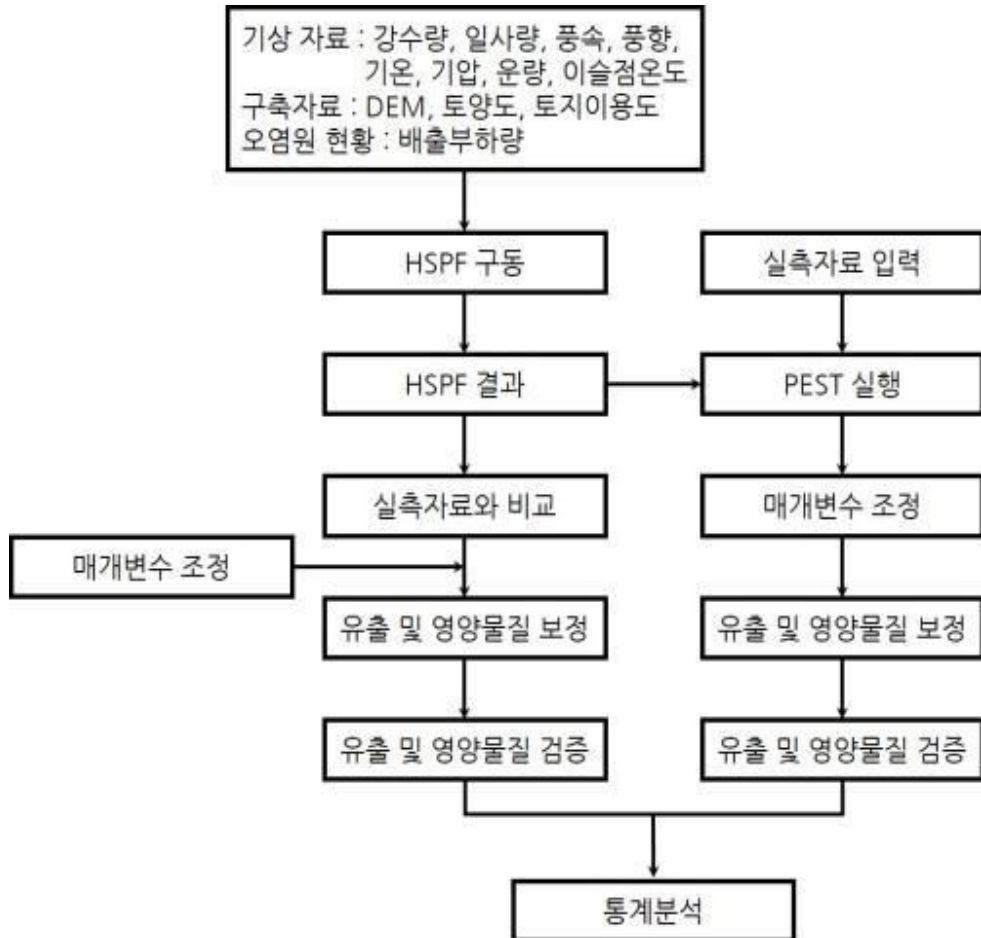
(1) 자동 검보정 프로그램(PEST) 개요

모형 적용에 있어 검보정은 모형입력인자를 조절하여 실측치와 예측치의 차이를 최소화 하는 과정이며 검정은 보정에서 결정된 매개변수 인자를 그대로 적용하여 실측치에 대한 예측치의 적용성을 평가하는 과정이다. 모형적용에 있어 보정과 검정과정은 모형의 정확성을 확보하는데 있어 반드시 이루어져야할 과정이나, 상세모형은 많은 보정인자를 필요로 하며, 시행착오법에 의한 검보정 과정은 많은 시간과 노력, 고도의 전문성을 요구하기 때문에 검보정 과정은 상세모형의 사용을 제한하는 중요한 요소로 작용한다. 뿐만 아니라, 시행착오법에 의한 모형 검보정에는 사용자의 주관성이 포함되어 있어 모형 사용자에게 따라 모형 검보정 결과가 달라질 수 있으며, 이는 장래예측을 포함한 시나리오 예측결과에도 영향을 미치기 때문에 모형 검보정에 있어서의 객관성 유지와 최적의 검보정결과를 도출하는 과정은 모형 적용에 있어 신중함을 기해야 한다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 상세 모형과 최적화 기법을 연계하여 모형을 적용하거나 자동보정모듈이 개발되어 적용되었으며, HSPF 모형의 경우 매개변수 인자를 자동으로 보정해 주는 PEST(Model-Independent Parameter Estimation)가 개발되었다(Doherty, 2005).

자동 검보정 프로그램은 기능적으로 크게 3개의 다음과 같은 요소로 구성되어 있으며, Parameter definition and recognition - 모형의 입력파일에 최적화할 인자값을 문자 형태로 표시하며, 저장된 임시파일(template file)을 읽어 들여, 최적화될 인자의 이름과 모형파일에서의 위치를 인식한다. 또한 사용자가 지정한 최적화될 최소인자값, 최대인자값 등을 인식함으로써 최적 인자 값의 오차를 줄이고, 모형 실행 후 인자값의 이상 수치에 대한 오류를 줄여 준다.

Observation definition and recognition은 - 모형의 결과 값 중 일부를 선택하여 최적화를 위해 목적함수를 계산할 때, 모형의 값을 실측값(Observation)이라 한다. 예를 들어, 모형은 일별로 연속적인 모의를 하지만 실측값은 월별로 나타내어진 불연속적인 값을 가질 때, 목적함수에 사용되는 모형의 결과값을 따로 계산해야한다. 결과값을 추출할 시간을 지정하는 파일은 instruction file로써 이 파일을 읽어 모형의 목적함수에 사용될 값을 추출한다.

Nonlinear estimation and predictive는 - PEST는 Gauss-Marquardt-Levenberg (GML) 기법을 사용하여 인자를 최적화하며, 다른 최적화 방법보다 모형의 실행회수가 적어 최적화에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다(Doherty, 2005).



<Fig. 2.8> HSPF-PEST Process

3. 국내외 연구사례

Table 2.2 는 최근 10년동안의 HSPF 연구사례를 나타내었으며, 하천 및 호소에서의 적용성 평가, 점 및 비점오염 수질개선대책에 대한 적용성 평가등이 이루어지고 있으며, 또한 신뢰성 향상을 위한 검보정 방법에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다.

Table 2.2 Case study research of HSPF model

저자	연도	주요내용
양원모	2007	강우시 유량유출율과 오염유달부하량을 산정하는데 BASINS/HSPF 모형의 적용성을 사례연구
신아현	2008	충주댐 유역의 유량과 수질을 모의하기 위해 WinHSPF 모형을 적용하여, 모형의 FTABLE의 수정을 통해 댐 저수지의 WinHSPF 적용성을 평가하고, 모형의 결과를 이용하여 전체 유역의 오염부하량을 산정에 관한 연구
전상완	2009	이동저수지 유역을 대상으로 기초자료를 활용하여 BASINS 내에 포함되어 많이 사용되고 있는 HSPF와 SWAT 모형을 비교 평가하고, 저수지로 유입되는 유출량의 특성을 분석 연구
최재훈	2010	비점오염원 유출 모형을 이용, 강우사상에 따른 비점오염원의 유출특성을 반영하여 유달부하량을 산정하고, 산정된 유달부하량을 이용하여 합리적인 저수지 수질예측을 위한 방법 도출 연구
황보현	2011	유역 내에서의 유출량을 예측하고 수질 분석을 통한 점원 및 비점오염원의 체계적인 관리를 위한 유역수질모델링의 전반적인 신뢰성과 적용성을 평가 연구
박태원	2012	유역 관리의 효율을 증진시키기 위해 유역수질모형인 HSPF를 이용하여 낙동강 유역에서의 비점오염원을 정량분석 연구
김광문	2013	HSPF 와 EFDC모형을 이용하여 금호강과 남강 유역의 수질 모델링을 실시하고 달성보와 함안보 지점의 보 설치 전·후의 수리 및 수질변화를 비교하여 유역의 수질 변동특성 연구
이유진	2014	환경기초조사사업에 의해 선정된 원단위를 활용하여 복합피복에 적용, HSPF&SWMM 모형을 구축하고 새로운 원단위를 적용하여 적합성을 확인 연구
조성진	2015	청미천 유역을 대상으로 배출부하량 산정을 하고, BASINS/WinHSPF 유역모형을 구축하여 수문 및 수질을 모의. 모의 후 검보정 과정을 거친 후 HSPF 모형의 Specific Action 모듈을 이용하여 축산비점오염이 청미천 수계에 미치는 영향 분석 연구
강성준	2016	HSPF모형을 이용하여 점 및 비점오염 수질개선대책을 적용하여 수질개선효과에 대해 분석하였으며, 수질예측정확도 향상을 위한 FTABLE 개선방법에 대해 연구

Table 2.3 는 HSPF-PEST연계에 대한 연구사례이며, 시행착오법과 자동 검보정 방법의 비교를 통하여 과학적이고 신뢰성 있는 검보정 방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

Table 2.3 Case study research of HSPF-PEST model

저자	연도	주요내용
Skahill	2006	PEST와 HSPF를 연계 적용하여 유출량을 최적화하였으며, GML기법의 개선된 효율성 연구
김태일	2010	임화호 유역의 유출량 자료를 이용하여 PEST프로그램 적용에 관한 연구
Jeon	2010	보청A유역을 대상으로 HSPF-PEST를 연계하여 유량 및 영양물질을 소유역 유달을 추정공식을 개발하였으며, 새만금유역을 대상으로 영양물질을 일별, 시간별 보정을 연구
김태일	2010	HSPF의 적용성을 평가하기 위해 낙동강 유역내의 총 6개의 유역을 연구대상 지역으로 선정하여 HSPF와 PEST를 연계적용 연구
최동호	2012	유역모형인 SWAT모형의 자동보정 기능과 HSPF모형 자동검보정 기능을 가진 SWAT-CUP과 HSPF-PEST를 주암호 유역내 소유역인 외남천 유역에서 적용 연구

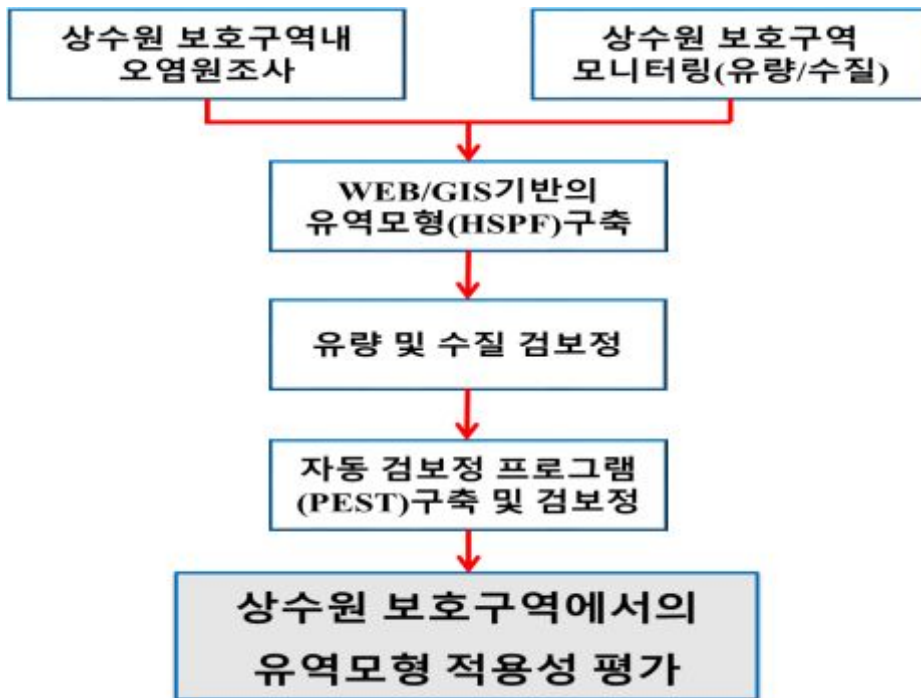
Ⅲ. 연구방법

1. 연구의 방법

본 연구의 추진방법은 <Fig. 3.1> 과 같으며, 우선 대상유역으로는 전북 부안군 변산면 중계리에 위치한 부안댐 유역으로 대부분의 유역이 상수원 보호구역에 해당된다.

유역의 오염현황을 파악하기 위해 오염원 조사 및 유량 및 수질모니터링을 실시하였다. 또한 유역모형 구축을 위해 유역도 및 하천도, 기상자료, 토지이용도, 수치고도모형 등의 기초자료를 조사하여 WEB/GIS 기반의 유역모형(HSPF)를 구축하였다.

또한 유량 및 수질에 대하여 시행착오법을 통해 검보정을 완료 후, 자동 검보정 프로그램(PEST)을 이용하여 시행착오법과의 비교를 통해 상수원 보호구역에서의 유역모형 적용성 평가를 실시하였다.



<Fig. 3.1> Reserch Flow

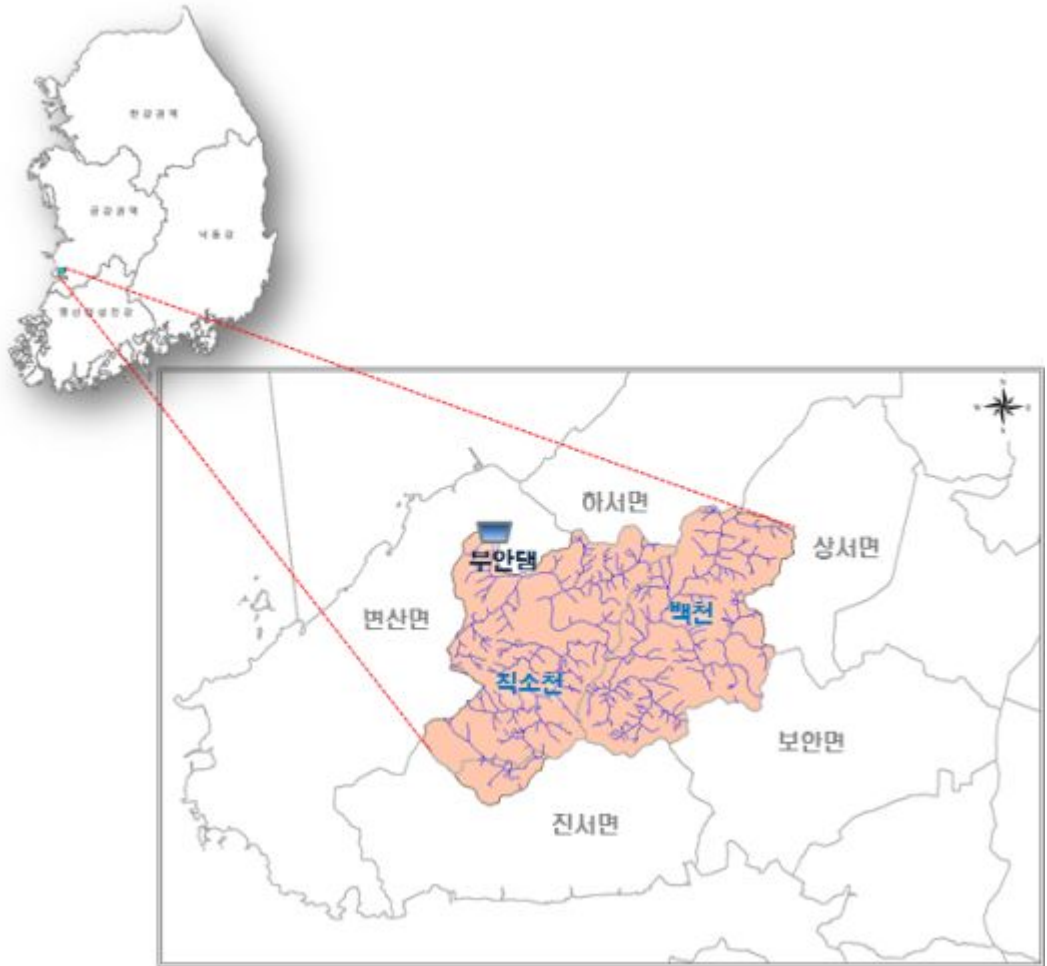
2. 대상 유역 현황

1) 대상유역의 개황

(1) 일반현황

본 연구의 대상유역인인 부안댐 유역은 <Fig. 3.2>와 같다. 행정구역상 부안군 상서면과 변산면에 위치하며, 유역의 전체면적은 57.06 km² 이다. 이중 상수원보호구역의 총 면적은 16.85 km²으로 유역전체의 30% 정도 차지하며, 행정구역상 부안군 상서면 청림리, 변산면 중계리, 진서면 석포리 등이 위치하고 있다. 부안댐 유역에 위치한 부안호로 유입되는 하천은 크게 직소천과 백천으로 구분할 수 있다. 직소천은 전라북도 부안군의 변산면의 망포대(492 m)에서 발원하는 하천이다. 발원지에서 남동쪽으로 흐르다 진서면 석포리의 대소 마을에서 동쪽으로 방향을 튼다. 대소마을에서 유하하다 다시 북쪽으로 방향을 바꿔 흐르면서 세봉, 분초대, 낙조대 자락에서 발원한 물을 합쳐 직소폭포(直沼瀑布)를 이루고 북동쪽으로 흘러 실상사 앞을 지나 중계리 사자동에서 쌍선봉 물과 합한다. 다시 동쪽으로 방향을 바꿔 흐르다 중계교 인근에서 백천(白川)을 합한 후 북서쪽으로 머리를 돌려 부안호로 들어간다(전라북도, 2007).

백천은 전라북도 부안군 상서면 청림리와 가오리 경계의 우금산성의 일부에서 발원하여 북서류하다 가는골 저수지로 유입한 후 약 200 m 유하하다 소지류 합류한다. 그리고 유향을 남서 방향으로 바꾸어 유하하며, 유동·청림 소하천과 소지류를 합류시킨 후 백천 하류구간에 위치한 거석교 지점으로부터 70 m 하류지점에서 지방하천 거석천이 좌안측으로 유입하고, 계속 유하하여 부안호로 유입하는 지방하천이다(전라북도, 2011).



<Fig. 3.2> Site of Buan-Dam Basin

(2) 수리수문

Table 3.1은 부안댐으로 유입되는 하천 현황을 나타내었다. 본류인 직소천은 제 1지류에 백천을 포함하고 있으며, 부안군 변산면 중계리에서 시작하여 부안군 하서면으로 흐르며 유역면적은 60.4km², 유로연장은 16.1km를 형성하고 있다. 제1 지류인 백천은 부안군 상서면 청림리를 기점으로 흐르고 있으며, 제 2지류인 거석, 청림, 유동천을 형성하고 있다(전라북도, 2011).

Table 3.1 Buan-Dam stream flow status

본류	제1 지류	제2 지류	제3 지류	기 점			종 점			유역 면적 (km ²)	유로 연장 (km)
				시·군	읍·면	리	시·군	읍·면	리		
직소천				부안	변산	중계	부안	하서		60.4	16.1
	백천			부안	상서	청림	부안	상서	청림	18.1	6.73
		거석천		부안	상서	청림	부안	상서	청림	7.47	5.57
		청림천		부안	상서	청림	부안	상서	청림	1.679	1.326
			새재천	부안	상서	청림	부안	상서	청림	0.349	0.881
			먹댕천	부안	상서	청림	부안	상서	청림	0.637	1.104
		유동천		부안	상서	청림	부안	상서	청림	1.480	1.996

(3) 오염원 현황

부안댐 유역은 전라북도 부안군 변산면 중계리 및 부안군 상서면 청림리가 해당된다. 2014년 인구에 의한 오염원 조사결과 중계리 106 명, 청림리 271 명이며, 축산계는 중계리 한우 48 마리, 청림리 한우 43 마리로 조사되었다(부안군, 2014).

(4) 부안댐의 제원 및 기타시설

부안댐은 전라북도 부안군 변산면 중계리에 소재하고 있는 다목적 댐이다. 저수총량은 1억 5,030만 m³이고, 유효량 3,560만 m³, 용수 공급은 3,510만 m³이며, 높이 50 m 길이 282 m의 댐이다. 부안댐은 서해안 개발에 따르는 인구 증가와 산업화 및 도시화의 촉진으로 급증하는 용수 수요를 충족시키기 위해서 조성되었으며, 현재 부안군·고창군의 상수원 역할 및 새만금지구의 공업용수까지 공급한다. 유역면적 59.0 km², 홍수위 43.8 m, 만수위 41.2 m, 저수위 23 m이다(국가수자원관리 종합정보시스템).

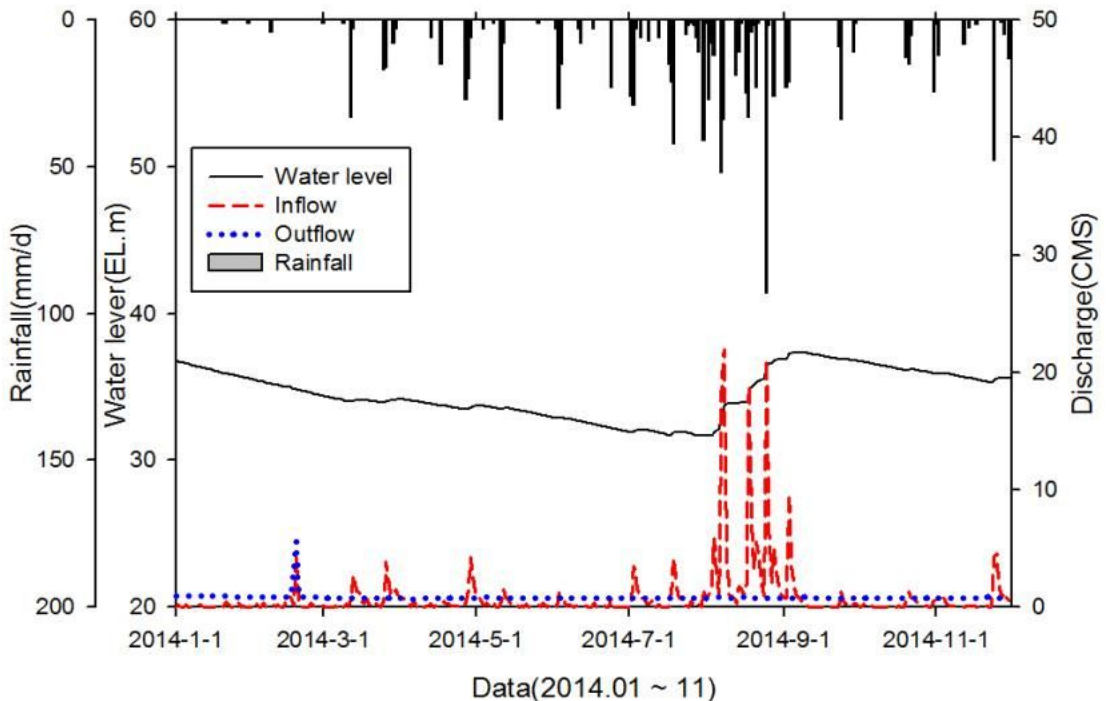
Table 3.2 Information of Buan-Dam

분 류	제 원	내 역
본 댐	위 치	전라북도 부안군 변산면 중계리
	형 식	콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 (C.F.R.D)
	댐 길 이	282 m
	댐 높 이	50 m
저 수 지	홍수만수위	EL 43.8 m
	상시만수위	EL 41.2 m
	저수위	EL 23.0 m
	총저수량	50.3백만 m ³
	유효저수용량	35.6백만 m ³
	홍수조절용량	9.3백만 m ³
	사수용량	4백만 m ³
여 수 로	설계홍수	1,674 m ³ /s
	최대방류량	664 m ³ /s
	문비형식	월류형

(5) 수문현황

부안댐 유역에서 2014년 1월부터 11월까지 강우량, 유입량, 방류량 및 저수위의 시계열 변화는 <Fig. 3.3>와 같다. 총 강우량은 1140.4 mm이며, 홍수기인 6월부터 8월까지 강우량(비율)은 682 mm(59.80%)로 나타났다. 이 기간 동안 8월에 많은 강우가 집중되었다(기상청, 2014).

무 강우일수를 제외한 일강우량의 범위는 1 ~ 93 mm이었고, 일평균값은 14.2 mm 이었다. 저수지의 일평균 유입량은 0.825 m³/s로 나타났으며, 강우 빈도가 높았던 8월 한 달의 일 평균 유입량은 4.826 m³/s로 나타났다. 일 유입량의 범위는 0.1~22 m³/s 이었으며, 일 방류량의 범위는 0.7 ~ 5.6 m³/s일로 평균 방류량은 0.862 m³/s로 나타났으며, 8월 한 달의 일평균 방류량은 0.848 m³/s로 나타났다. 일 저수위 평균값은 34.6 m이었으며, 범위(수위차)는 31.66 ~ 37.37 m(5.71 m)이었다(국가수자원관리 종합정보시스템).

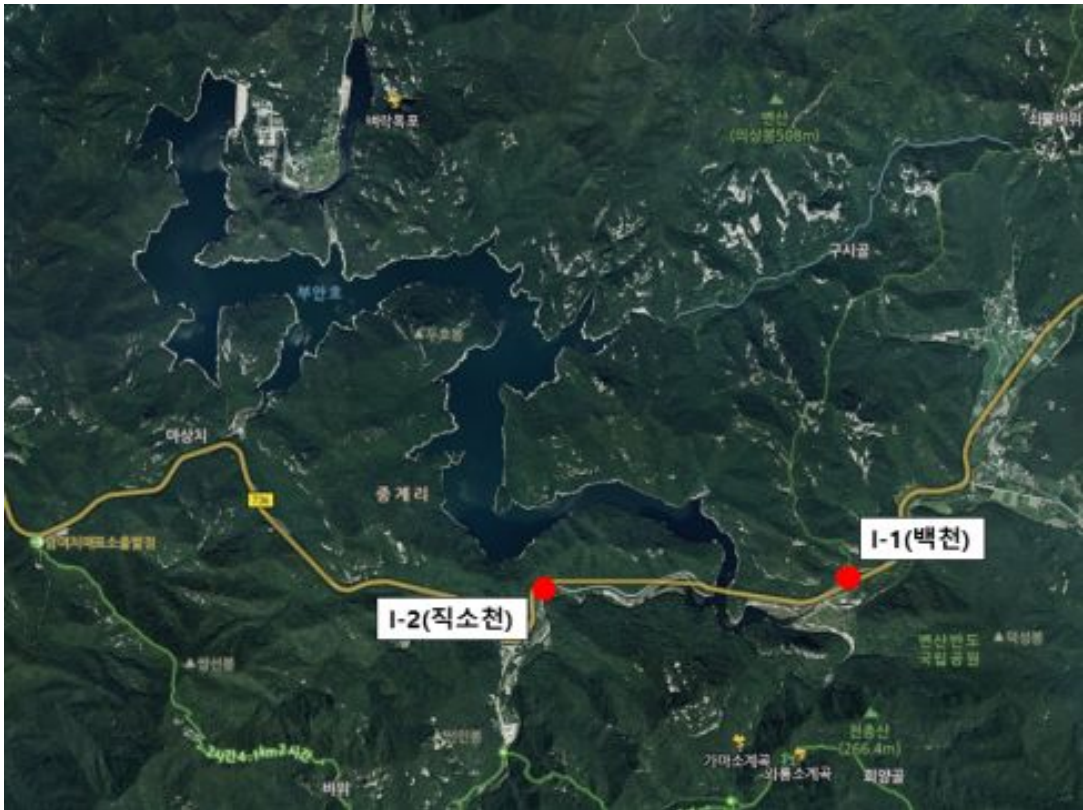


<Fig. 3.3> Status on Floodgate of Buan-Dam

3. 유량 및 수질 모니터링 조사

1) 조사지점 및 시기

부안댐 유량 및 수질 조사지점은 <Fig. 3.4>와 같이 부안댐 유입하천인 백천 (I-1), 직소천 (I-2)의 말단으로 2지점이며, 조사 시기는 2014년 7월 ~ 11월까지이며, 강우시 조사는 8월 25일 ~ 26일이며, 이때 강수량은 95mm으로 나타났다.



<Fig. 3.4> Survey site of Buan-Dam Basins

2) 조사방법 및 항목

유량측정 시 현장측정 항목인 수온, DO, pH는 수질다항목측정기기 YSI556MPS를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 유량은 각 지점별 횡단면을 측정하고, 측정 시 수위와 유속을 측정하여 산정하였다.

유입하천의 유량 측정은 날개차식 유속계인 Swoffer - Model 3000을 이용하여 유속-면적법을 따라 측정하였다. 하천에서의 강우시 수질조사는 일 강우량이 20 mm 이상일 때 강우사상 당 15회 이상 연속조사를 하였다. 수질농도의 부하가 증가할 시점부터 유량 및 오염물질농도 Peak를 확보하도록 30분~1시간 간격으로 연속조사를 시행하였고, Peak를 포함한 부하변동기간 이외에는 2~4시간 등으로 조사 간격을 조절하여 시행하였다. 수질 분석항목은 SS, BOD₅, COD_{Mn}, T-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P 등이며, 수질분석은 수질오염공정시험기준에 준하여 분석하였다.



I-1



I-2

<Fig. 3.5> Survey site of Buan-Dam Basin Inflow

4. 유역(HSPF)모형 구축

1) 입력자료 구축

HSPF모형의 기본 구동은 BASINS 프로그램에서 이루어지며 BASINS는 기본적인 구동은 미국 자료위주로 구성되어 있으며, 국내 유역경계에 맞도록 파일을 변환시켜서 적용하여야 하였다. 유역모형 구축에 필요한 입력 자료는 Table 3.3와 같이 각 기관으로부터 자료를 수집하여 입력하였다.

모형의 입력자료 중 토지이용도는 2008년 기준으로 작성된 전국 토지이용도(환경부 환경지리정보시스템)를 이용하였으며, DEM의 경우 수치지형도(국가공간정보유통시스템)에서 추출하여 입력하였다. 기상자료는 국가기센망을 이용하여 해당 유역에 해당하는 기상청 산하 관측소를 확인하였으며, 이에 따라 부안기상관측소의 ‘2005 ~ 2014’ 년 까지 기상자료를 기상청으로부터 제공받아 입력하였다.

Table 3.3 Input Data Model Basin

자료	출처	Scale	자료 특성
수치고도모형	국가공간정보시스템	1:5,000	Digital Elevation Model; 30 m × 30 m
토지이용도	환경부	1:25,000	2008년 중분류 토지피복 (도시, 산림, 농경지, 물, 등)
기상자료	기상청	Daily	2005~2014년 (강수량, 평균온도, 상대습도, 일사량, 전운량 등)
유량·수질	실측자료	month	실측자료 2014년 07월~11월 (유량, DO, COD, BOD, T-N, T-P 등)
유역 경계도	환경부	-	단위유역도, 중권역도, 시도군 경계도 등

(1) 유역도 및 하천도

부안댐 상류 유역도는 ArcView GIS 기반인 BASINS 프로그램에서 환경부에서 제공한 소권역 Shape파일로 Table의 속성을 바꾸어 구축하였다. 하천도의 경우도 국토해양부 (www.wamis.go.kr; 국가수자원관리 종합정보시스템)에서 제공한 하천차수도 파일을 이용하였으며, <Fig. 3.6>은 부안댐 유역의 소하천을 나타내었다.



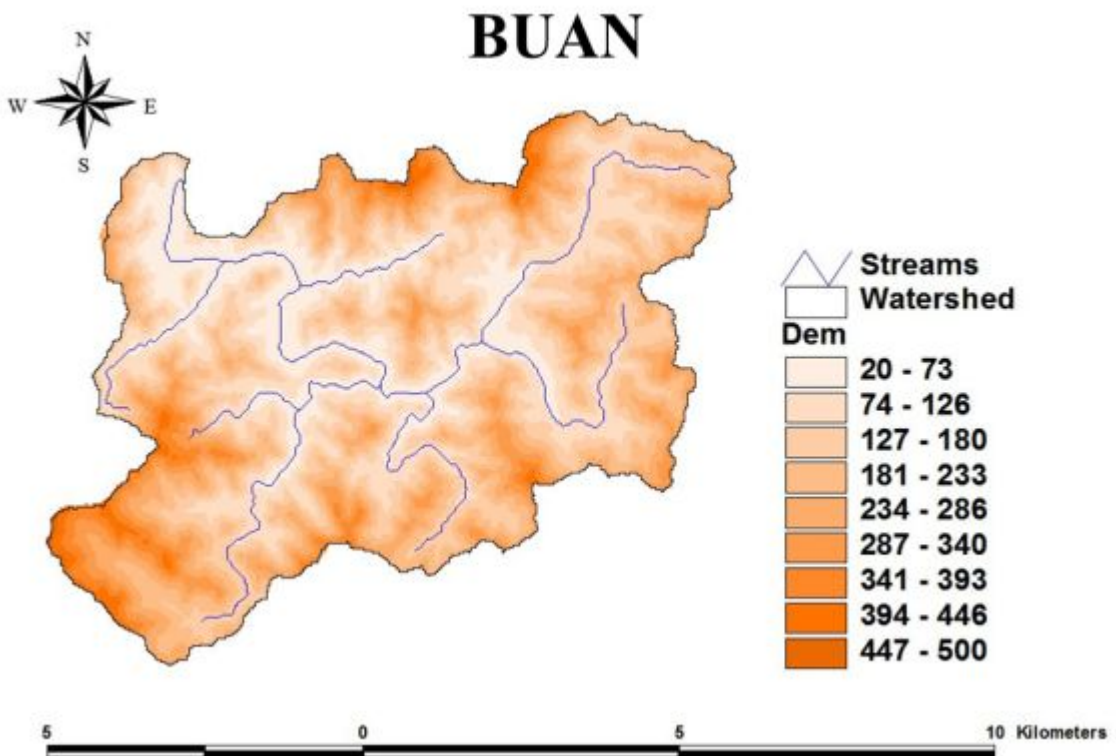
<Fig. 3.6> River and Catchment Basin of Buan-Dam

(2) 수치고도모형

수치고도모형은 대상지역을 격자로 나누고 각 격자간의 평균 고도값과 각각 격자간의 위상관계를 포함하고 있어, 대상지역의 지형을 표현 할 수 있는 수치자료이며, 수치고도모형을 이용한 대상유역의 하천 흐름도와 유역기울기 등을 나타낸다. 본 연구에서는 국가 공간정보 유통시스템에서 제공되는 2013년도 수치지형도(GRS 800) 자료를 이용하여 구축하였다.

수치지형도에서는 제시된 고도자료(Elevation)는 유역도 및 하천도와 함께 유역을 여러 개의 수문학적으로 연결된 소유역으로 나누는데 이용된다. 이러한 지형자료는 모두 Shape.file 형태로 변환되어서 입력되며, 모두 소유역의 위치를 예측하는데 이용된다.

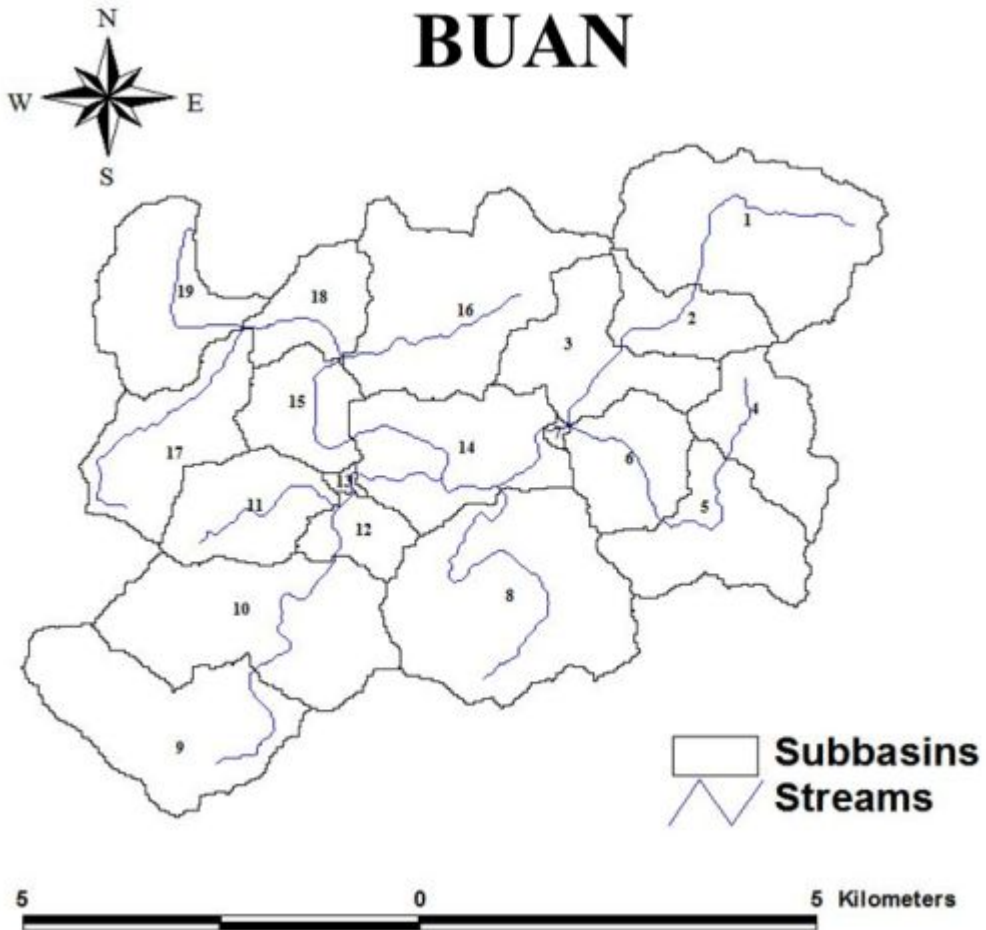
또한, DEM(Digital Elevation Model)는 HSPF의 입력 및 출력에 이용된다. 입력 자료로 하천도가 흐름의 위치를 예측하는데 사용될 수 있다. DEM은 흐름의 위치를 정확하게 예측할 수 있기 때문에 하천도를 입력하는 것은 수문학적인 분할 및 소유역 경계를 만드는 것을 향상시킬 수 있다. <Fig. 3.7>는 Basins 프로그램을 이용하여 부안댐 유역의 DEM을 출력한 결과이다.



<Fig. 3.7> DME Build Results

(3) 소유역 분할

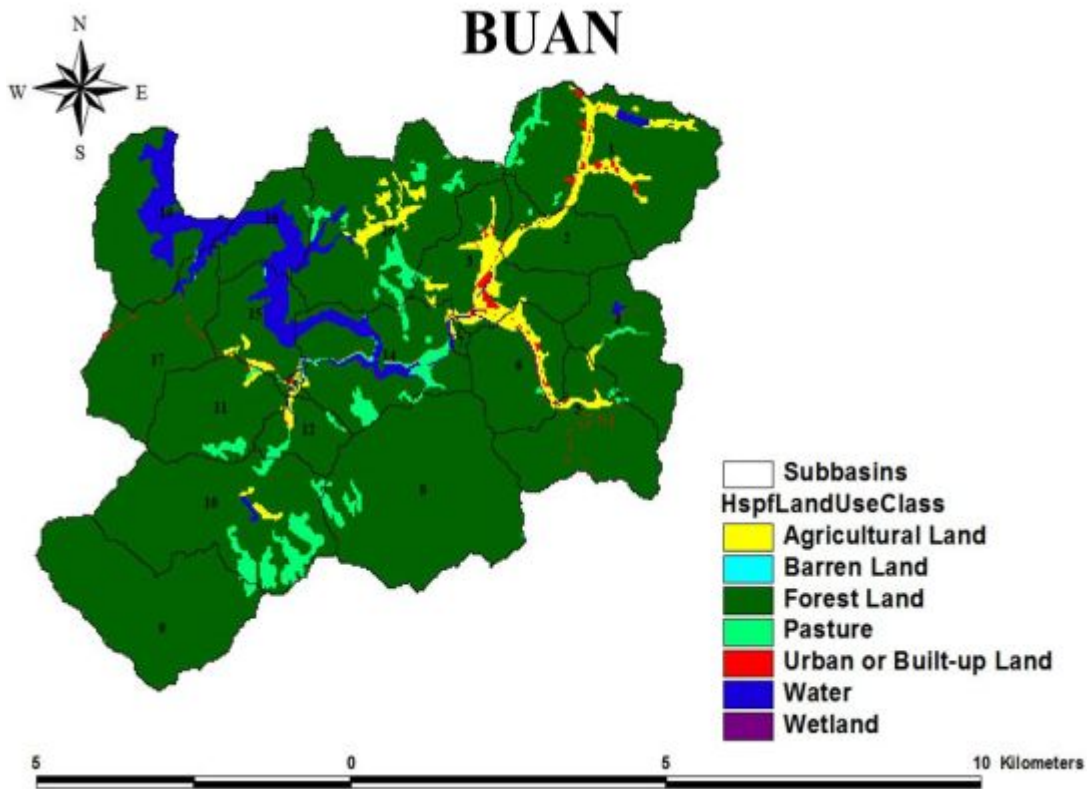
지형자료 입력 후에는 BASINS에서 Automatic Delineation Utility를 사용하여 소유역을 분할하며, 소유역의 분할 시 검보정을 용이하게 하기 위해 수질측정 위치를 고려하여 분할하였다. <Fig. 3.8>과 같이 분할된 소유역은 총 19개이다.



<Fig. 3.8> Watershed the Segmentation Process

(4) 토지이용도 입력

BASINS에서는 <Fig. 3.9>는 토지이용도를 이용해 분할된 소유역에 대한 각각의 토지 이용정보를 입력하였다. 입력된 토지이용도는 HSPF 모형에 적절하도록 재분류되며, 모형에서 비점오염원 유출에 주요한 영향을 줄 수 있다. 환경부에서 제공받은 토지피복 분류 데이터를 이용하여 도시, 논, 밭, 산지, 나지, 습지, 저수지, 초지 등을 BASINS 내에 입력하여 HSPF 에 반영하였다.

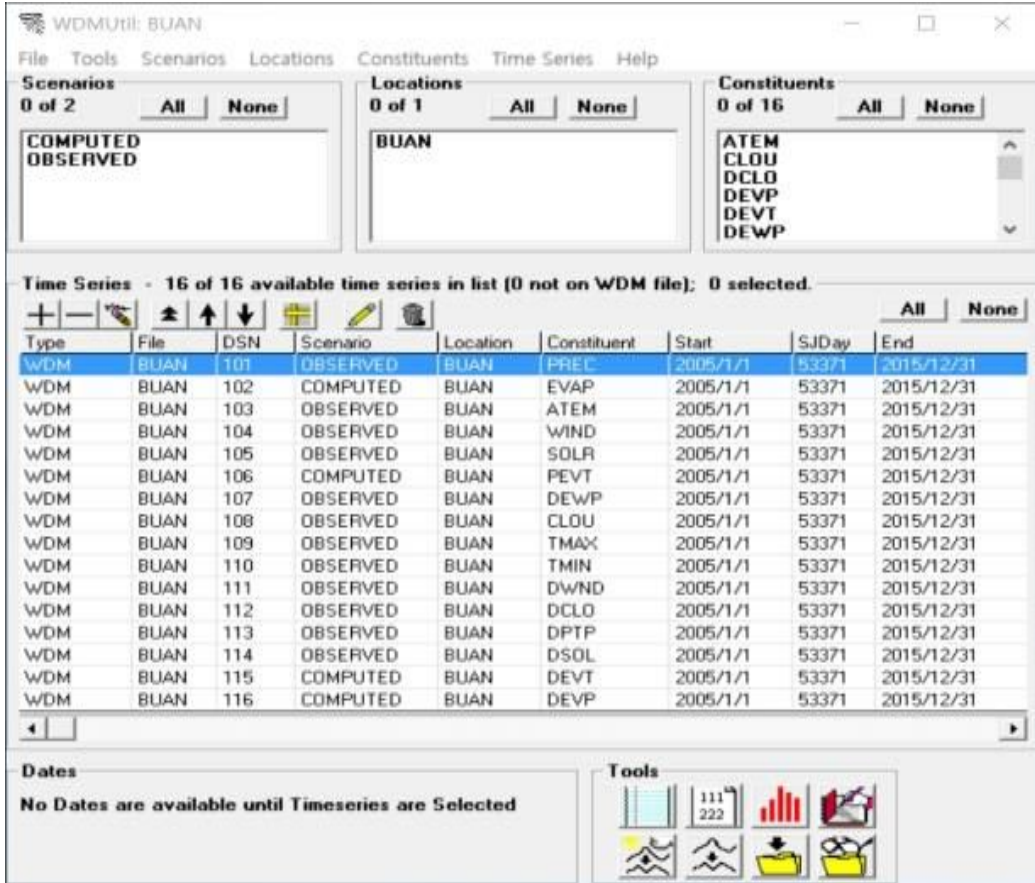


<Fig. 3.9> Land use Data Input Process

(5) 기상자료 입력

HSPF모형의 기상데이터는 2005년부터 2014년 12월까지 부안기상대의 자료를 입력하였으며, 강수량, 풍향, 풍속, 일사량, 전운량, 상대습도 값이 이에 해당한다.

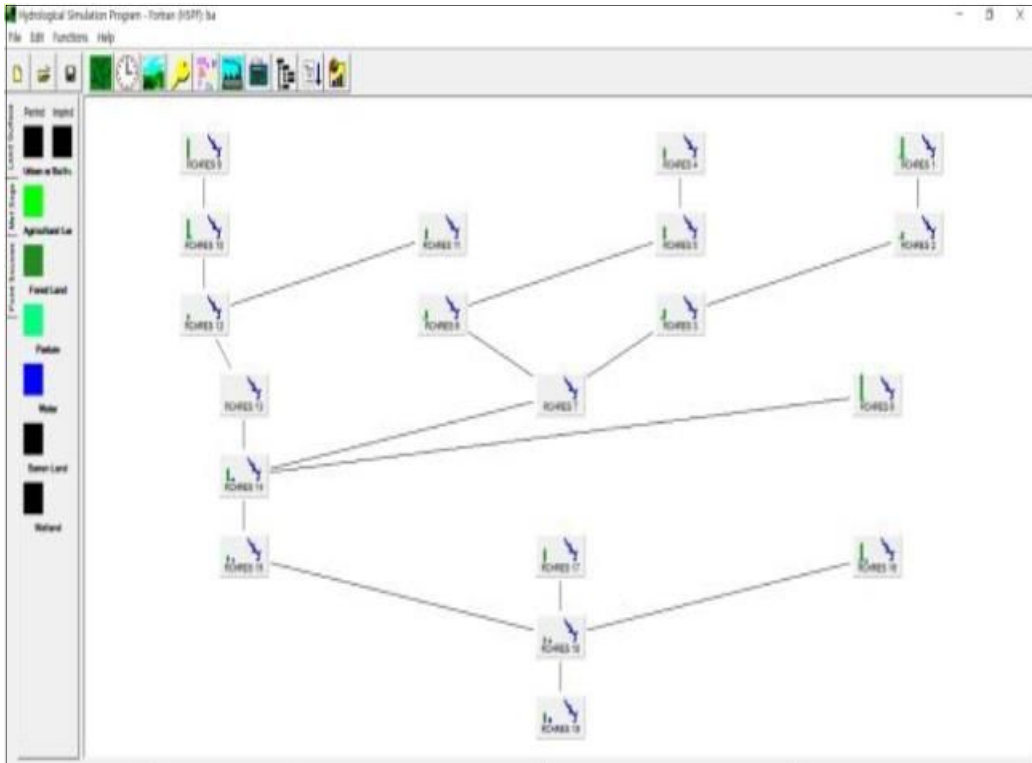
입력방식은 WDMutil을 이용하였고, 입력된 데이터의 예는 다음 <Fig. 3.10>과 같다.



<Fig. 3.10> Meteorological Data Input Process

(6) HSPF 모형 구축

따라서 상기와 같이 입력자료를 이용하여 <Fig. 3.11>와 같이 19개의 Reach가 구성되었으며, 검보정 지점은 RCH7, RCH13 두 지점이다.



<Fig. 3.11> HSPF Build Results

2) 유역모형 검보정

(1) 유역(HSPF)모형 검보정 방법

유역(HSPF)모형의 모의기간은 2014년 08월 25일부터 2014년 08월 27일까지이며, 강우시 조사 기간에 맞춰서 검보정을 실시하였다.

모형의 검보정은 시행착오법과 자동 검보정 프로그램을 이용하여 수행하였다. 시행착오법은 모형의 다양한 변수의 초기 값의 변화로 상관계수 및 결정계수 등의 최적점을 찾는 방법으로 반복 횟수가 충분할 경우 전체 근사 최적점에 도달 가능한 방법이 나, 시간이 많이 소요된다는 단점을 갖는다(이승창, 2009). 또한 모형의 효율성을 평가하기 위해 차이 퍼센트 (% Diff)를 산정하였으며 식은 다음과 같다.

$$\% Diff. = \left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \times 100 \quad (1)$$

여기서, O_i 는 실측값, P_i 는 예측값, \bar{P}_i 예측값의 평균, n 은 데이터의 수를 의미한다.

Table 3.4는 현재까지의 HSPF모형의 적용사례 및 연구 자료를 바탕으로 (Donigian, 2000)은 일반적인 모형효율의 범위와 신뢰구간을 제시하였다. 이를 바탕으로 모형의 적용성을 평가하였다.

Table 3.4 Accreditation Scope of Model Results Correction

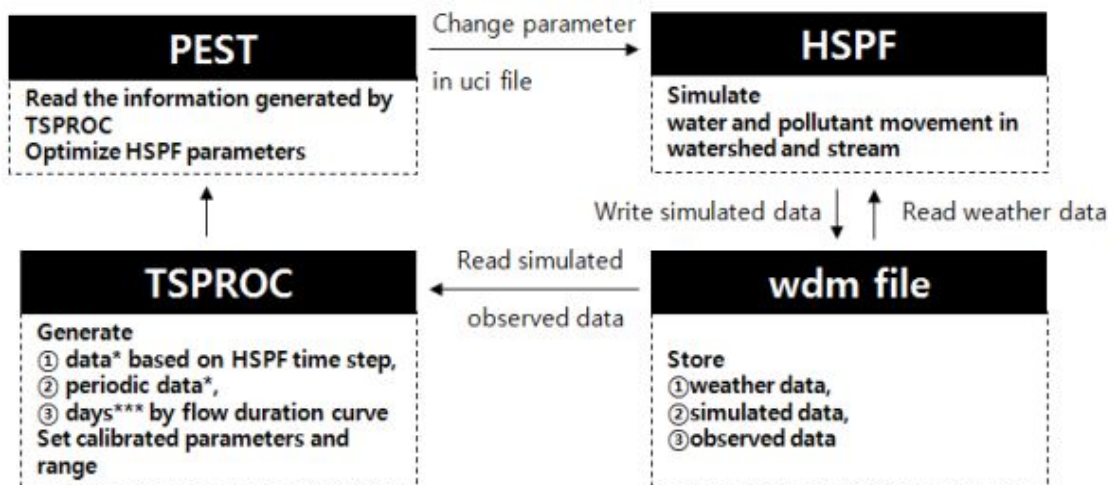
	Very Good	Good	Fair	Poor
<u>% Diff.</u>				
Water flow	<10	10~15	15~25	-
Water quality	<15	15~25	25~35	-

3) 자동 검보정프로그램(PEST) 구축

(1) TSPROC 개요

HSPF의 최적화를 위해서 PEST 최적화프로그램과 함께 추가적으로 개발된 TSPROC (Time Series PROCessor) 프로그램은 HSPF의 예측치와 결과치를 저장하는 wdm 파일을 다루는 중요한 프로그램이다. <Fig 3.12>는 HSPF와 wdm 파일, PEST, TSPROC와의 관계를 나타내고 있다. HSPF는 wdm파일에 있는 기상입력자료를 읽어 들여 모형을 실행하고 모의된 결과 값은 wdm파일에 저장된다. TSPROC에서는 wdm파일에 저장된 실측치와 예측치의 time series를 그대로 읽어 들여 pst파일로 출력한다. 또한 dates.dat 파일에서 지정한 시간간격에 따라 time series의 값을 더하여 실측치와 예측치의 값을 PEST의 입력파일인 pst파일에 출력한다. 따라서, wdm의 실측치와 예측치의 time series간격은 dates.dat 에서 지정한 시간간격보다 항상 작거나 같아야 한다. TSPROC 입력파일 내에 사용자가 지정한 유출량(최대 30개 유량)에 따른 실측치와 예측치의 발생확률을 각각 계산하여 pst파일로 출력한다.

PEST 프로그램은 TSPROC에서 출력한 보정인자 항목과 범위를 참조하여 보정인자에 대하여 난수를 발생시키고 HSPF입력파일인 uci 파일에 입력시킨 후 HSPF를 구동시킨다. 새롭게 모의된 예측치와 기존의 실측치를 참조하여 TSPROC에서 생성한 세가지 종류의 실측치와 예측치의 값에 대하여 목적함수를 구함으로써, 최적의 HSPF 보정인자를 찾아간다 (김진원, 2014).



<Fig. 3.12> Relationship between PEST/TSPROC and HSPF models

연속적인 일평균 실측 유량을 보유하여 PEST-TSPROC를 이용하여 HSPF를 자동검보정을 할 경우 일반적으로 dates.dat에서의 시간간격을 월별로 하여, ① wdm에서 직접 읽어 들인 일별 유출량, ② dates.dat에 의한 월별 유출량, ③ 유량대비 발생일수에 의한 유황곡선(flow duration curve)을 모두 고려하거나 선택적으로 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다(EPA, 2000).

(2) TSPROC 입력파일 분석(*.dat)

① GET_SERIESM WDM 블록 1

- 모의값 추출을 위한 wdm파일과 DSN 지정
- CONTEXT는 "all"
- FILE에 모형이 모의한 결과가 저장되는 wdm파일명을 지정
- DSN에 wdm파일에서 모의하고자 하는 소유역의 일별 유출값이 저장되는 DSN 번호를 지정
- 추출할 timeseries의 새로운 이름을 할당 : NEW_SERIES_NAME에 "nflow"

② GET_SERIES WDM 블록 2

- 실측값 추출을 위한 WDM파일과 DSN 지정
- CONTEXT는 "all"
- FILE에는 실측값이 저장되어 있는 wdm파일명을 지정
- DSN에 wmd파일에서 모의하고자 하는 소유역의 일별 실측 유출값이 저장되어 있는 DSN 번호를 지정
- 추출할 timeseries의 새로운 이름을 할당 : NEW_SERIES_NAME에 "oflow"

③ NEW_TIME_BASE 블록

- CONTEXT는 "all"
- 내삽을 할 timeseries 지정: SERIES_NAME을 지정 : SERIES_NAME을 nflow
- 목적함수계산을 위한 실측치의 timeseries 이름 지정 : TB_SERIES_NAME을 oflow
- 내삽을 통해 새롭게 생성될 timeseries이름 지정 : NEW_SERIES_NAME을 mflow

④ VOLUME_CALCULATION 블록

- mflow의 timeseries를 이용하여 월 유출유량을 생성 : SERIES_NAME을 mflow
- dates.dat에 의해 데이터를 합치는 일 범위를 설정
- 생성될 월 유출유량에 대한 timeseries 이름 지정 : NEW_V_TABLE_NAME을 mvol
- FLOW의 시간단위 지정: FLOW_TIME_UNITS을 seconds

⑤ EXCEEDENCE_TIME 블록

- 발생일수 계산을 위한 timeseries 지정 : SERIES_NAME을 mflow
- 발생일수 단위 지정 : EXCEEDENCE_TIME_UNIT을 days
- 새롭게 생성될 테이블 이름 지정 : NEW_E_TABLE_NAME을 mtime
- 발생일수를 계산할 유출량 지정 : “FLOW 유출량”

⑥ LIST_OUTPUT 블록

- TSPROC프로그램에 의해 생성될 출력파일이름 지정 : FILE을 model.out
- 출력할 항목을 지정
SERIES_NAME을 mflow
V_TABLE_NAME을 mvol

(3) WRITE_PEST_FILES 블록 작성

① General Information

- CONTEXT pest_prep: CONTEXT 지정
- NEW_PEST_CONTROL_FILE case1.pst: 새롭게 생성될 PEST의 컨트롤 파일 이름 지정
- TEMPLATE_FILE example1.tpl: template file 지정
- MODEL_INPUT_FILE example1.uci: uci파일 지정
- NEW_INSTRUCTION_FILE model.ins: 새롭게 생성될 instruction file 지정
- PARAMETER_DATA_FILE initpar1.dat: parameter data file 지정
- PARAMETER_GROUP_FILE groups1.dat: parameter group file 지정
- MODEL_COMMAND_LINE model1.bat: HSPF 프로그램 실행과 입력파일, TSPROC프로그램 실행과 입력파일 지정을 위한 배치파일

② Information pertaining to flow time series

- OBSERVATION_SERIES_NAME oflow: 실측치의 timeseries 지정

- MODEL_SERIES_NAME mflow: 예측치의 timeseries 지정
- SERIES_WEIGHTS_EQUATION $1.0/(@_abs_value+0.001)$: 다음과 같은 식을 계산
- SERIES_WEIGHTS_MIN_MAX $1e-5$ 1000: 다음의 범위를 포함하는 유량만 추출

③ Information pertaining to flow volumes

- OBSERVATION_V_TABLE_NAME oflow: VOLUME_CALCULATION 블록의 TB_SERIES_NAME과 일치
- MODEL_V_TABLE_NAME mvol: VOLUME_CALCULATION블록의 NEW_V_ TABLE_NAME과 일치
- V_TABLE_WEIGHTS_EQUATION $1.0e-2/\sqrt{(@_abs_value)}$

④ Information pertaining to exceedance probabilities

- OBSERVATION_E_TABLE_NAME otime
- MODEL_E_TABLE_NAME mtime
- E_TABLE_WEIGHTS_EQUATION 300.0

4) TSPROC 실행

- ① tsproc프로그램 입력파일 입력: tsproc1.dat를 입력
- ② tsproc실행에 의해 생성될 참조파일 지정: tsproc.rec를 입력
- ③ model.out파일을 열어 출력값을 확인

IV. 결과 및 고찰

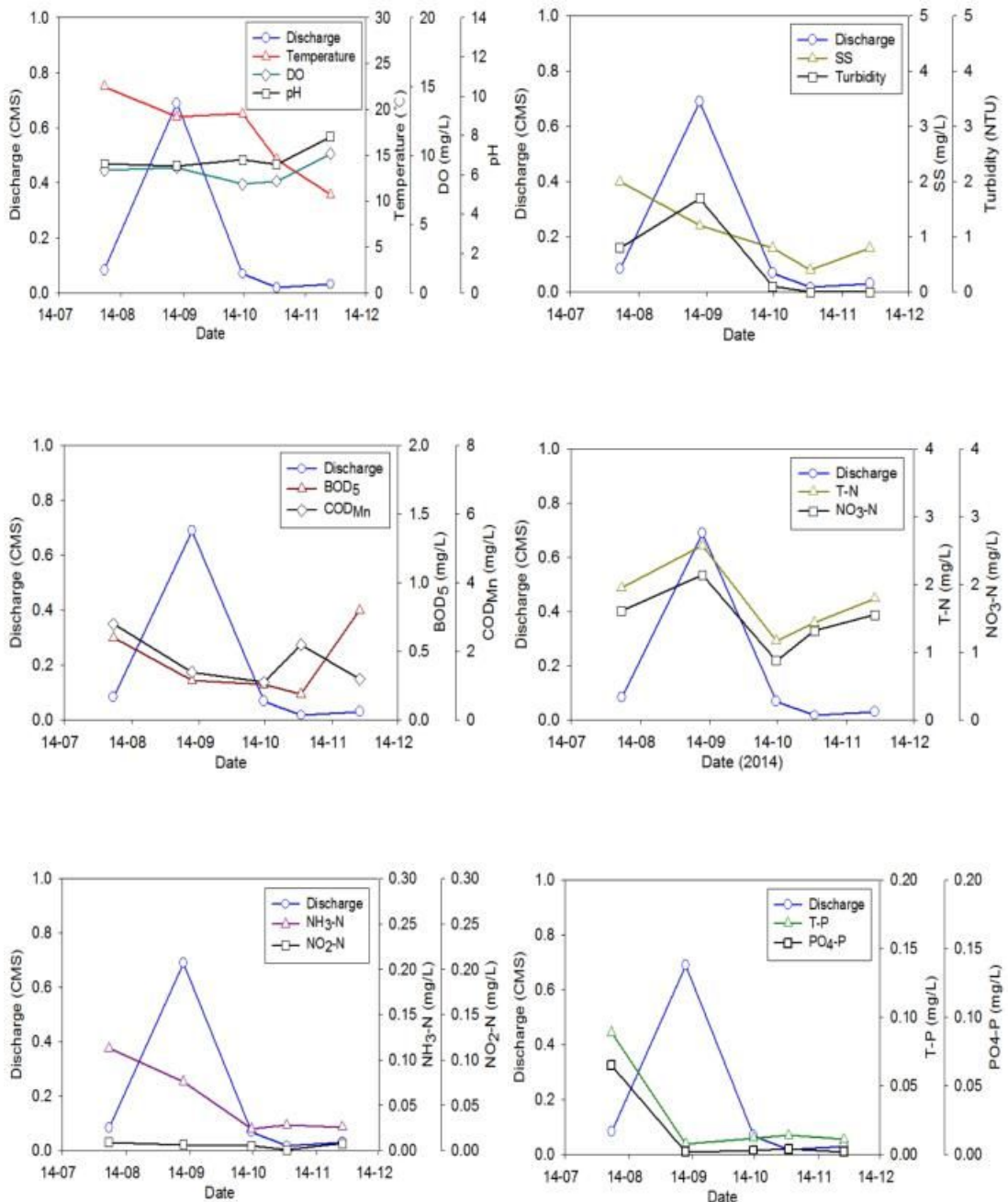
1. 유량 및 수질 모니터링 조사결과

1) 유입하천 조사결과

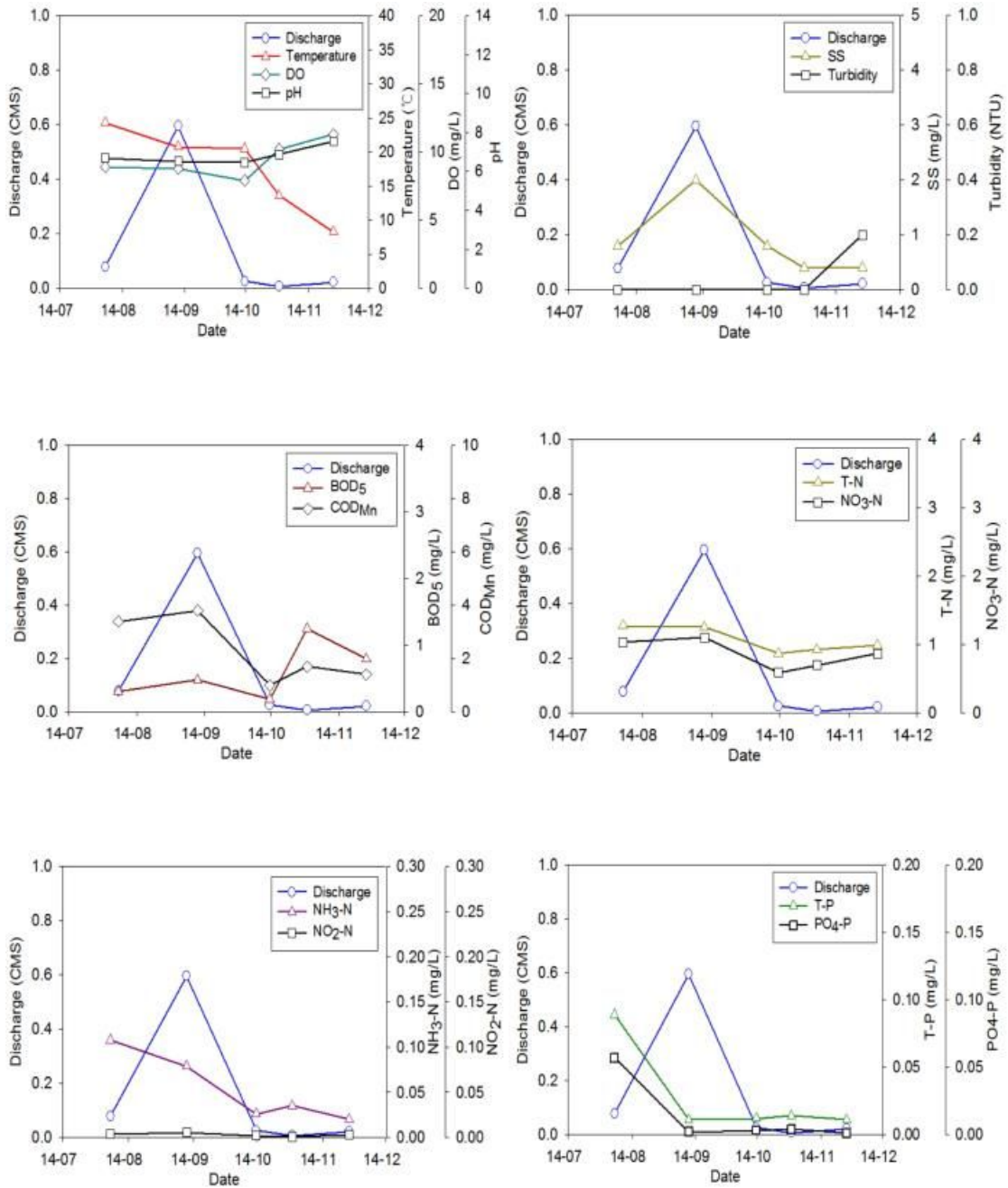
(1) 평수기 조사결과

부안댐 상류 유입하천 유량 및 수질조사는 2014년 7월부터 11월까지 총 5회 조사하였다. <Fig 4.1~4.2>는 평수기 조사 결과인 유량과 수질의 시계열 변동 결과이며, I-1지점은 pH는 6.5~8.0, DO는 7.9~10.1 mg/L, 수온은 10.7~22.5 °C, 탁도는 0.01~0.56 NTU, COD_{Mn}은 1.1~2.8 mg/L, BOD₅는 0.2 ~ 0.8 mg/L이다. T-N은 1.171~2.573 mg/L, NO₃-N은 0.875~2.139 mg/L로 T-N 중에서 대부분을 차지하고 있다. T-P는 0.008~0.089 mg/L, PO₄-P는 0.002~0.065 mg/L, SS는 0.4~2.0 mg/L이다. 유량은 0.018~0.689 CMS로 장마기간인 8월에 일시적으로 증가하였다가 감소하였다. I-2지점은 pH는 6.5~7.5, DO는 7.9~11.3 mg/L, 수온은 8.3~24.3 °C, 탁도는 0.01~1.50 NTU, COD_{Mn}은 1.0~3.8 mg/L, BOD₅는 0.2~1.3 mg/L이다. T-N은 0.867~1.278 mg/L, NO₃-N은 0.595~1.104 mg/L로 I-1 지점과 비슷하게 나타났다. T-P는 0.011~0.087 mg/L, PO₄-P는 0.001~0.057 mg/L, SS는 0.4~2.0 mg/L이다. 유량은 0.007~0.596 CMS로 평균 0.146 CMS로 나타났다.

pH, DO, BOD, SS은 매우좋음(Ⅰa)등급, COD 매우좋음(Ⅰa)~좋음(Ⅰb)이다. T-P 7월 갈수기에 약간좋음(Ⅱ), 8월~11월에서는 매우좋음(Ⅰa)이다. 부안댐 상류 유입하천은 상수원보호구역으로 생활계, 축산계 등의 오염원이 적어 좋은 등급을 유지하는 것으로 나타났다.



<Fig. 4.1> Monthly Flow and Water Quality (I-1)



<Fig. 4.2> Monthly Flow and Water Quality (1-2)

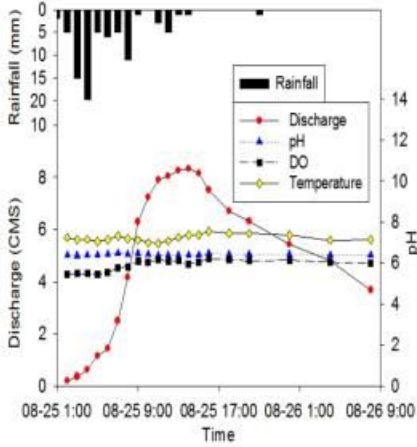
(2) 강우시 조사결과

강우유출수로 비점오염물질 유출특성을 조사하기 위한 강우 시 조사는 2014년 8월 25 ~ 26일동안 조사하였다. 이때 발생한 강우량은 기상청 자료 95mm으로 나타났으며, <Fig. 4.3~4.8>는 강우시 조사한 유량 및 수질농도 변화결과이다. I-1 조사결과 pH는 6.4~6.5, DO는 7.8~8.9 mg/L, 수온은 19.9~20.8 °C, 탁도는 0.01~7.34 NTU, COD_{Mn}은 1.2~5.6 mg/L, BOD₅는 0.4~0.7 mg/L이다. T-N은 1.697~2.659 mg/L, T-P는 0.002~0.026 mg/L, PO₄-P는 0.001~0.007 mg/L, SS는 0.4~16.4 mg/L이다. 유량은 0.184~8.325 CMS로 나타났다. I-2 조사결과 pH는 6.4~6.5, DO는 8.0~8.7 mg/L, 수온은 20.1~21.3 °C, 탁도는 0.64~6.35 NTU, COD_{Mn}은 2.0~6.4 mg/L, BOD₅는 0.3~0.7 mg/L이다. T-N은 0.972~1.682 mg/L, T-P는 0.005~0.015 mg/L, PO₄-P는 0.001~0.003 mg/L이다. SS는 1.2~15.6 mg/L, 유량은 0.265~7.693 CMS로 나타났다.

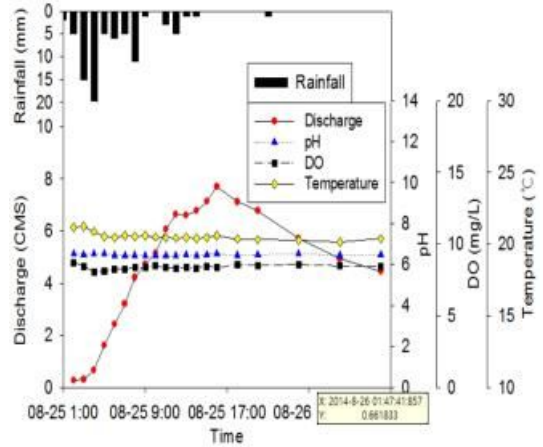
비점오염물질의 유출특성중 초기 강우시 오염물질의 유출이라고 할 수 있다. 오염물질의 유하거리 및 속도에 따라 오염물질의 농도변화가 일어난다.(장성호, 2005), BOD와 COD는 거주지의 면적비와 관련이 있어서 인간 활동에 의한 오염지표로 이용되는 수질항목이다(이호준, 1999). 영양염류인 질소와 인은 농촌지역에서의 시비의 세탈과 용탈, 축사폐수에 기인한 것으로 보고된다(신영규, 2004). SS는 강우강도에 따라 비교적 민감하게 나타난다(박종관, 1994).

비점오염원에 의한 오염물질의 발생은 강우강도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이며(오영택, 2004), 조사지역의 환경(생활계, 축산계, 토지계 등)에 따라서 항목별 차이가 나타났다.

유기물, 영양염류, SS등은 유출수문곡선과 비슷한 경향으로 강우 초기에 증가하다가 첨두유량 이후에 감소하는 것으로 나타났으며, 조사지역은 상수원보호구역으로 경작 및 개발의 제한으로 주로 임야가 대부분을 차지하여 유기물, 영양염류, SS등 농도의 변화는 크지 않는 것으로 나타났다.

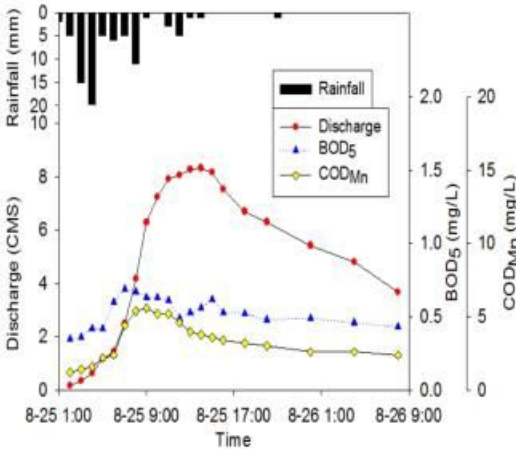


I-1

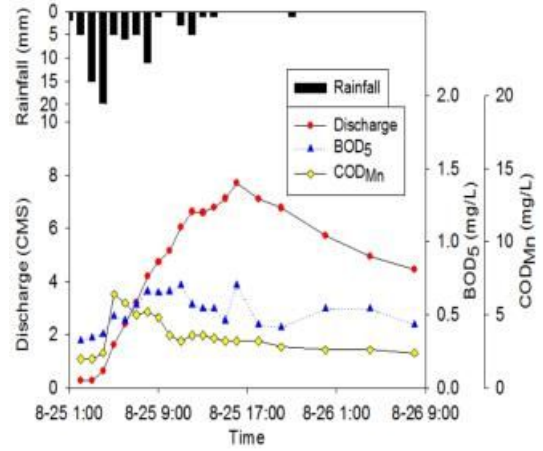


I-2

<Fig. 4.3> Rainfall, Survey Results (pH, DO, Temperature)

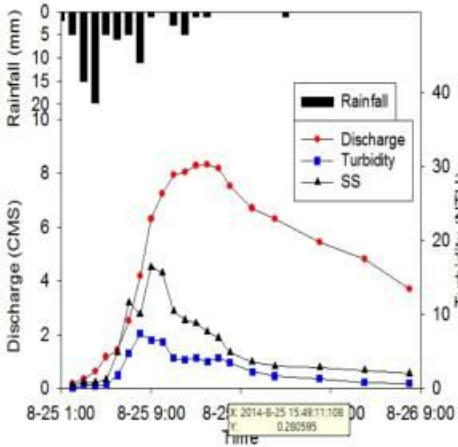


I-1

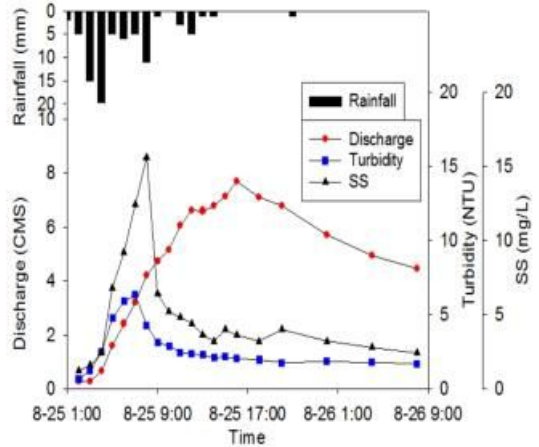


I-2

<Fig. 4.4> Rainfall, Survey Results (BOD₅, COD_{Mn})

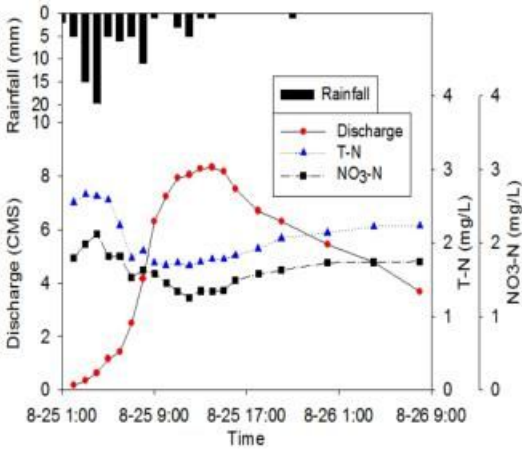


I-1

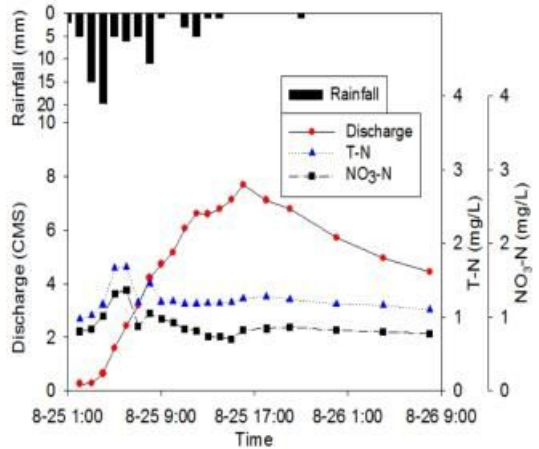


I-2

<Fig. 4.5> Rainfall, Survey Results (Turbidity, SS)

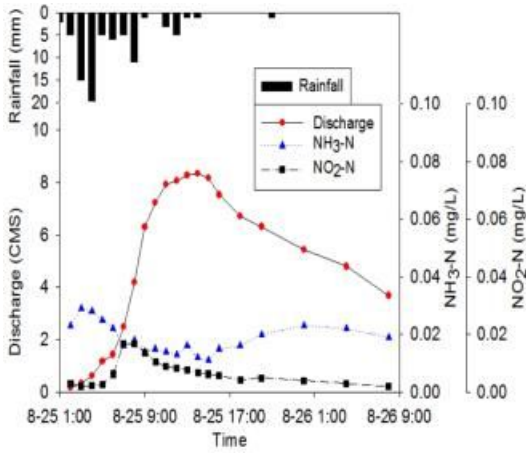


I-1

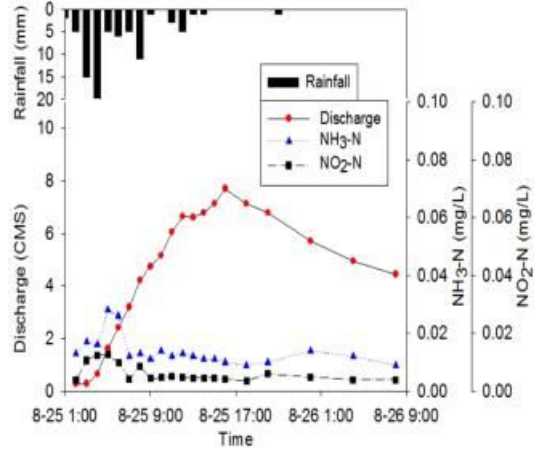


I-2

<Fig. 4.6> Rainfall, Survey Results (T-N, NO₃-N)

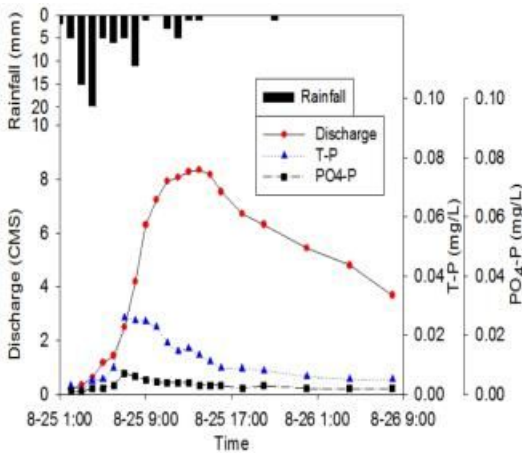


I-1

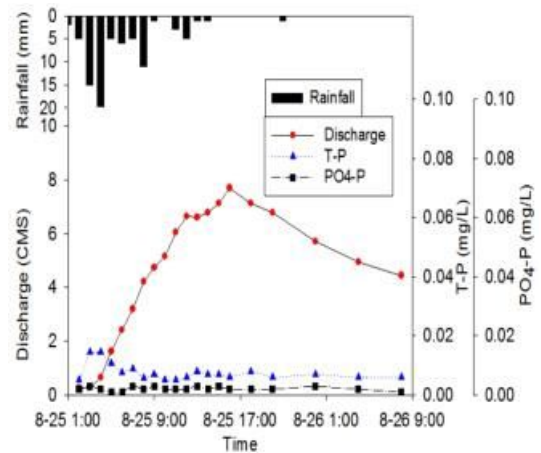


I-2

<Fig. 4.7> Rainfall, Survey Results ($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$)



I-1



I-2

<Fig. 4.8> Rainfall, Survey Results (T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$)

2. 유역모형(HSPF) 검토정 결과

1) 유량 검토정 결과

유량 검토정시 사용한 매개변수는 침투능력 (INFEXP, INFILD, INFILT), 지하수 (DEEPER, AGWRC 및 KVAR), 유입수 (INTFW 및 IRC), 잠재적인 E-T (BASETP, AGWETP 및 LZETP), 지표면 유출 (LSUR, SLSUR, NSUR), 저급 상부 영역 (LZSN, UZSN)등을 구분하여 변경하였으며, Table 4.1은 매개변수별 범위를 나타내었다.

Table 4.1 Hydrologic simulation and calculation parameters for the range

매개변수 (Units)	변수설명	범위 *
LZSN (in)	Lower zone nominal storage	3.0~8.0
INFILT	Soil infiltration capacity index	0.01~10.0
AGWRC(day)	Groundwater recession coefficient	0.85~0.99
SLSUR(in ⁻¹)	slope of the assumed overland flow plane	0.01~1.0
UZSN(mm)	Upper zone nominal storage	0.01~1.0
KVARY (mm ⁻¹)	Groundwater recession parameter	0.0~3.0
INFEXP	Infiltration equation exponent	1.0~3.0
INFILD(in)	Ratio between maximum and mean infiltration capacities	1.0~3.0
INTFW	Interflow inflow parameter	0.0~10.0
IRC(day ⁻¹)	Interflow recession parameter	0.1~0.999
LZETP	Lower zone ET parameter	0.1~0.9
DEEPER	Fraction of groundwater inflow lost to deep groundwater	0.0~1.0
BASETP	Fraction of PET that can be satisfied from base flow	0.0~1.1
AGWETP	Fraction of PET that can be satisfied from groundwater	0.0~0.2
CEPSC(in)	Interception storage capacity	0.01~0.4
NSUR	Manning's n for the overland flow plane	0.05~0.5

*: USEPA (2000), BASINS Technical Note 6

BASINS Technical Note 6에서 지정한 검보정범위에 따라 적정 변수값을 적용하였으며, Table 4.2는 불안댐 유역에 적용한 매개변수 범위를 나타내었다.

Table 4.2 Adjustment range of parameters related to floodgates

매개 변수 (Units)	LZSN (in)	INFILT	AGWRC (day)	SLSUR (in-1)	UZSN (mm)	KVARY (mm-1)	INFEXP	INFILD (in)
검보정값	4.0~ 6.5	0.02~ 0.16	0.92~ 0.98	0.1626~ 0.4469	0.128~ 2.128	1.0~3.0	2	2

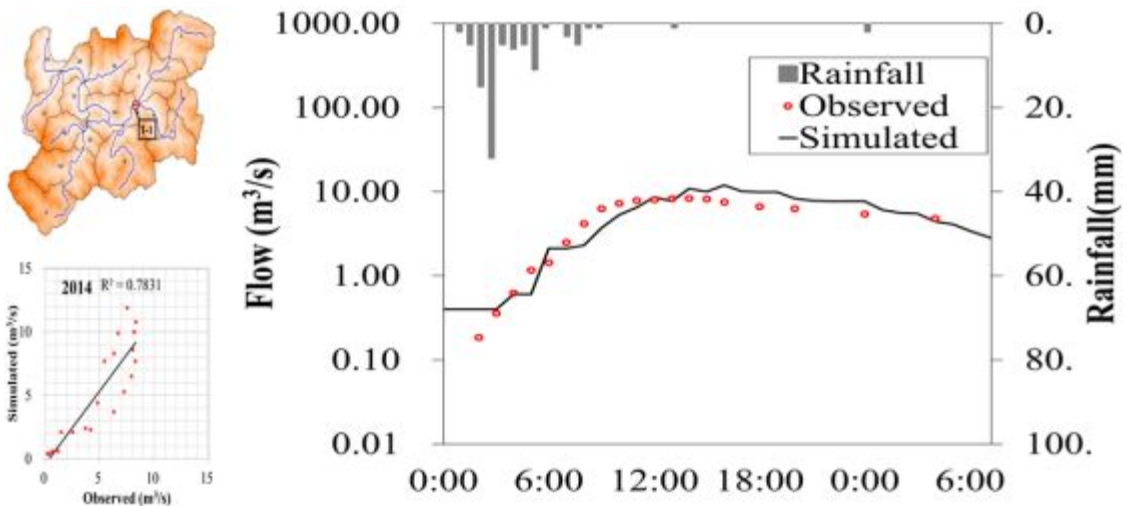
매개 변수 (Units)	INTFW	IRC (day-1)	LZETP	DEEPER	BASETP	AGWETP	CEPSC (in)	NSUR
검보정값	0.05~ 0.35	0.3	0.1	0	0.02	0	0.1	0.2

(1) I-1 결과

부안댐의 경우 유역안에 유량 측정소가 없어 강우시 모니터링 자료를 이용하였으며, 2014년 08월 25일 ~ 26일 조사에서 검보정을 실시하였다. I-1 지점에서 검보정을 한 결과는 Table 4.3 및 <Fig 4.9>와 같으며, % difference -6.63으로 Table 3.4의 모형효율 평가기준에서 10% 이내이므로 “Very Good” 으로 나타냈다.

Table 4.3 Flow Calibration results (I-1)

구분	I-1				
	측정값(O)	모의값(S)	O/S	% difference	모형효율
Flow	4.96	5.29	0.94	-6.63	Very Good



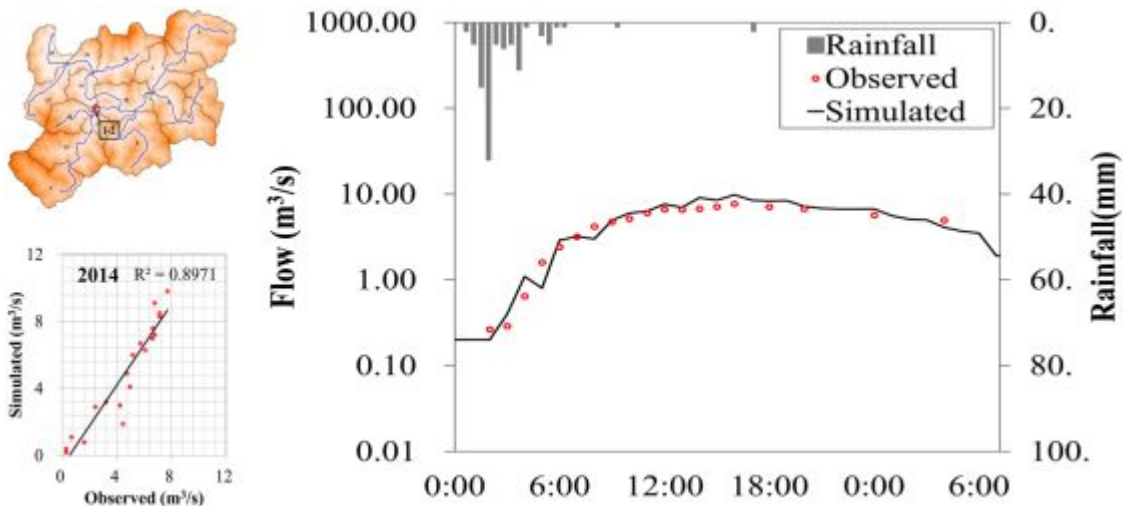
<Fig. 4.9> Flow Calibration results (I-1)

(2) 1-2 결과

1-2도 마찬가지로 강우시 모니터링 자료를 이용하였으며, 2014년 08월 25일 ~ 26일 조사자료로 검보정을 실시하였다. 1-2 지점에서 검보정을 한 결과는 Table 4.4, <Fig 4.10>와 같으며, % difference -7.16으로 Table 3.4의 모형효율 평가기준에서 10% 이내이므로 “Very Good” 으로 나타났다.

Table 4.4 Flow Calibration results (1-2)

구분	1-2				
	측정값(O)	모의값(S)	O/S	% difference	모형효율
Flow	4.62	4.95	0.93	-7.15	Very Good



<Fig. 4.10> Flow Calibration results (1-2)

2) 수질 검보정 결과

수질 검보정은 유량에 대한 검보정을 완료한 후 강우 시 실측자료를 이용하여 수온, DO, BOD, T-N, T-P 5항목에 대하여 모의하였다. Table 4.5는 수질모형의 매개변수의 범위와 보정값을 나타내었다.

Table 4.5 Scope and application of the parameter values

매개변수 (Units)	변수설명	범위 *	검보정값
KEVAP	The evaporation coefficient	1.0~10.0	2.24
REAK (hr ⁻¹)	Empirical constant for reaeration equation	0.01~1.0	0.2
KBOD20 (hr ⁻¹)	BOD decay rate at 20° C	0.0~none	0.001
KODSET (ft/hr)	BOD settling rate	0.0~none	0.002~ 0.017
BENOD	Benthic oxygen demand at 20° C (mg/m ² · day)	0.0~none	50.0
EXPOD	Exponential factor to benthic oxygen demand function	0.1~none	1.22
KTAM20	Nitrification rate of NH ₄ at 20° C	0.001~none	0.015
KN0220	Nitrification rate of NO ₂ at 20° C	0.001~none	0.002
KN0320	Denitrification rate at 20° C	0.001~none	0.002
MALGR	Temperature corrected maximum algal growth rate (/hr)	0.008~0.3	0.1~0.2
ALR20	Algal respiration rate (/hr)	0.0~none	0.005
PHYSET	Phytoplankton settling rate (ft/hr)	0.001~0.55	0.005
MBAL	Maximum benthic algae density (mg/m ²)	0.0~none	2500.0

* : 국내 토지환경에 적합한 CN값 적용

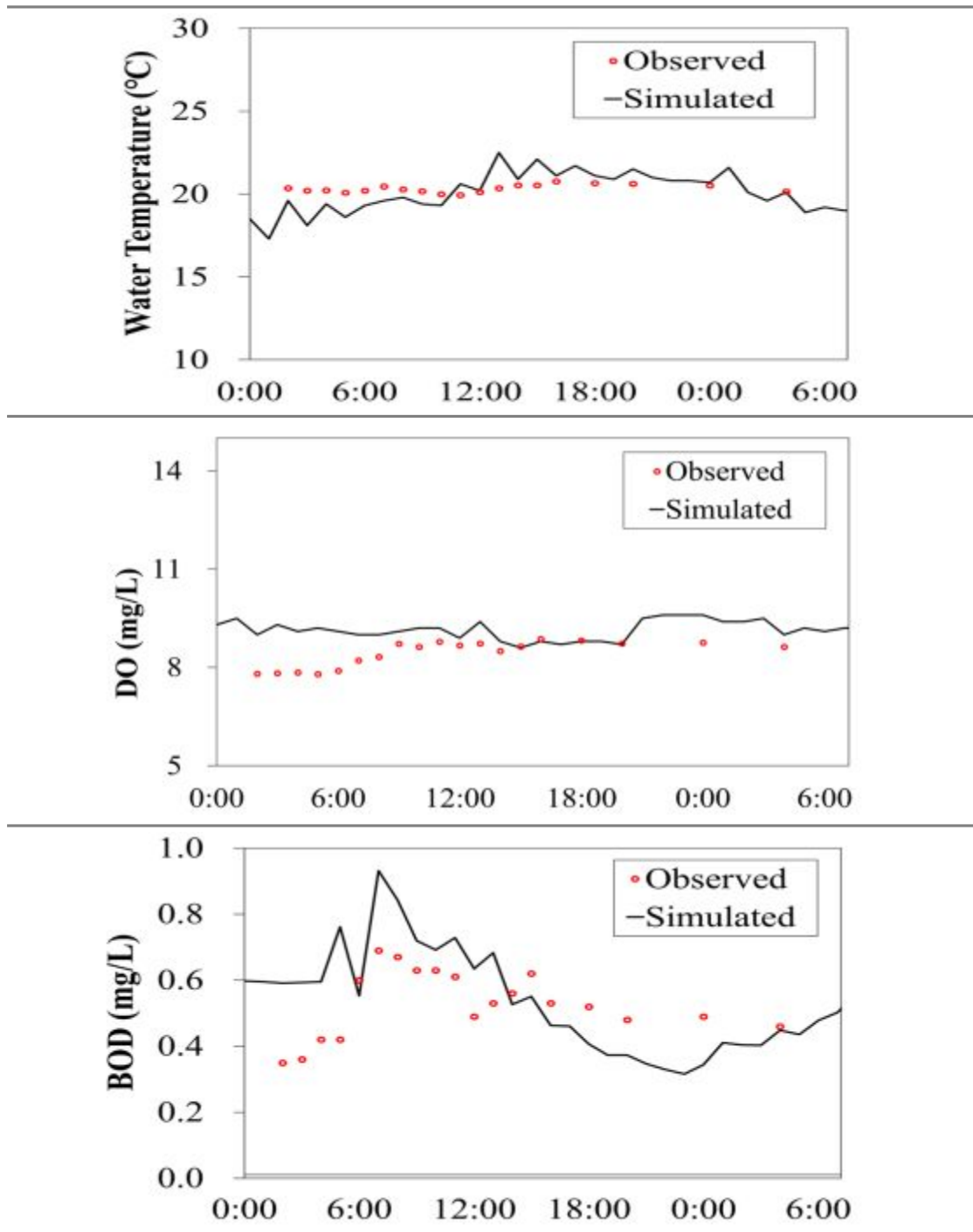
** : built-up, storage, wash-off, groundwater 등의 월별 입력자료

(1) I-1 결과

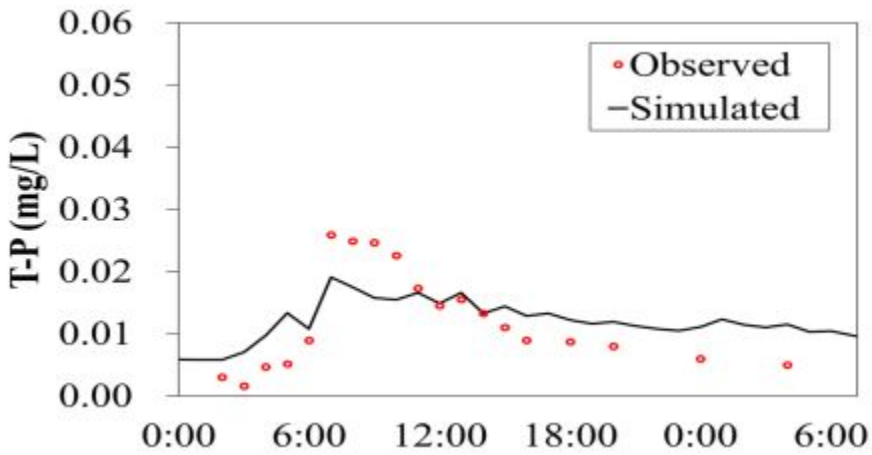
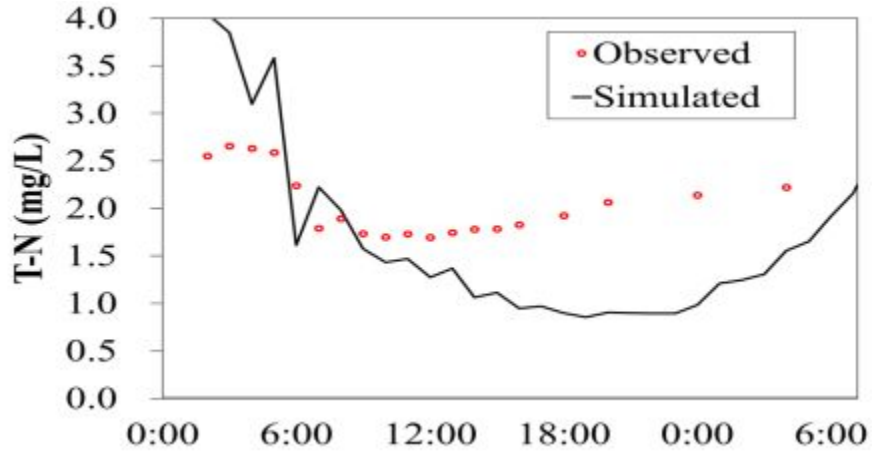
I-1 지점의 검보정 결과 Table 4.6과 같다. Table 3.4의 모형효율 평가기준으로 비교 하였을 때, 수온의 경우 % Difference는 -6.63, O/S은 0.94로 나타났으며, DO의 경우 % Difference는 -7.23, O/S은 0.93으로 나타났다. BOD의 경우 % Difference는 -14.35, O/S은 0.87로 나타났다. 영양염류 모의결과 T-N의 경우 % difference 8.17, O/S 1.09로 산정되었으며, T-P의 경우 % difference -10.22, O/S 0.91로 나타났다.

Table 4.6 Water correction results (I-1)

구분	I-1				
	수온 (℃)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
측정값(O)	20.32	8.44	0.52	2.05	0.012
모의값(S)	20.15	9.05	0.60	1.88	0.013
O/S	1.01	0.93	0.87	1.09	0.907
% difference	0.86	-7.23	-14.38	8.17	-10.22
모형효율	very good	very good	very good	very good	very good



<Fig. 4.11> Water Calibration results (WT, DO, BOD)(I-1)



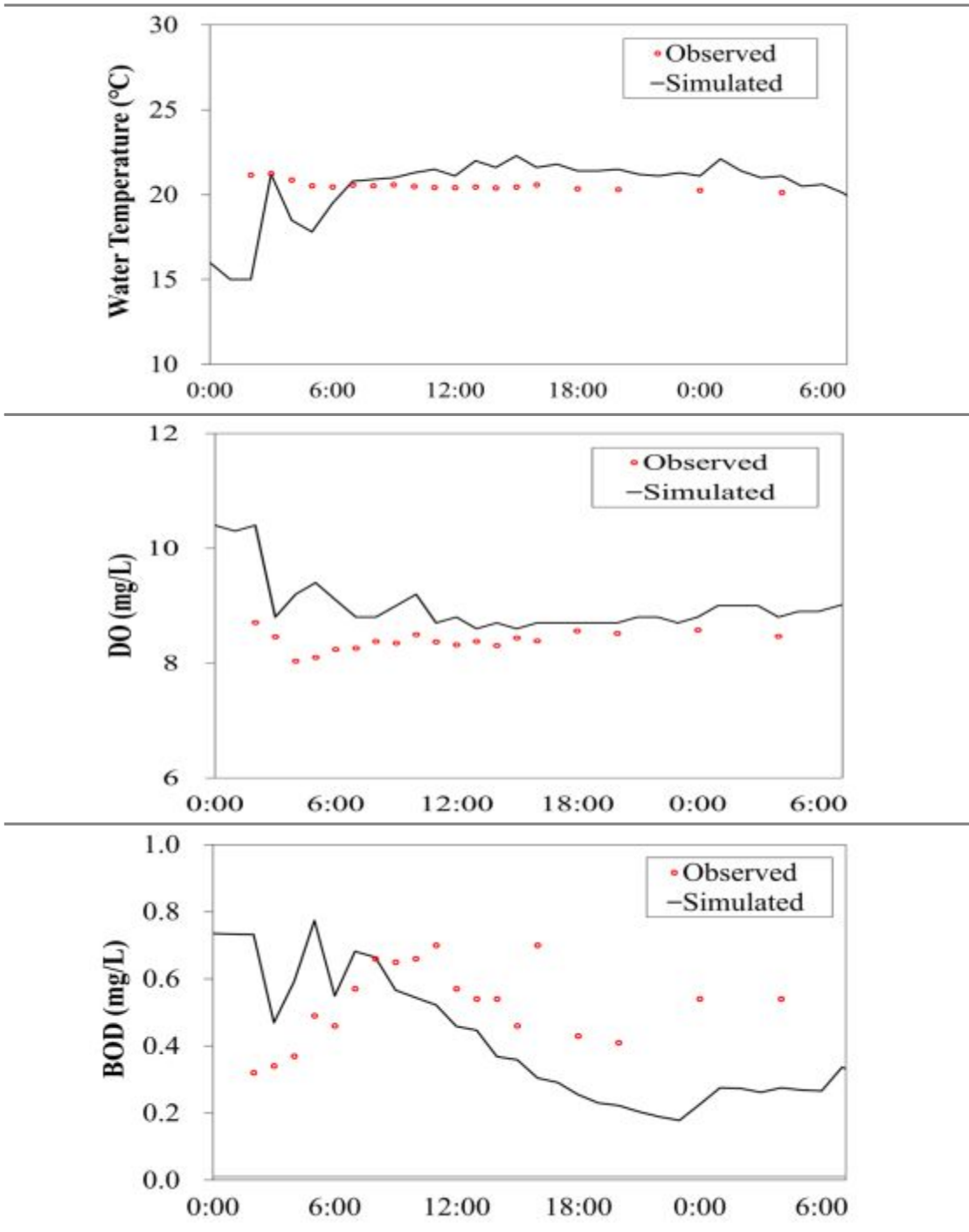
<Fig. 4.12> Water Calibration results (T-N, T-P)(I-1)

(2) 1-2 결과

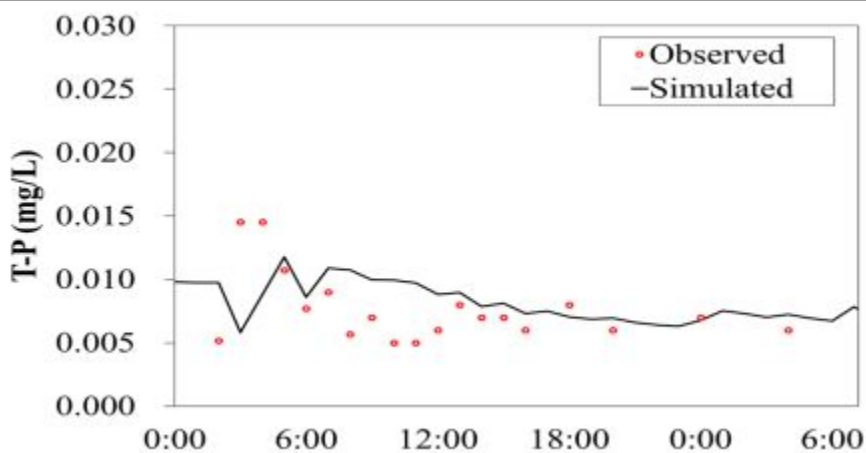
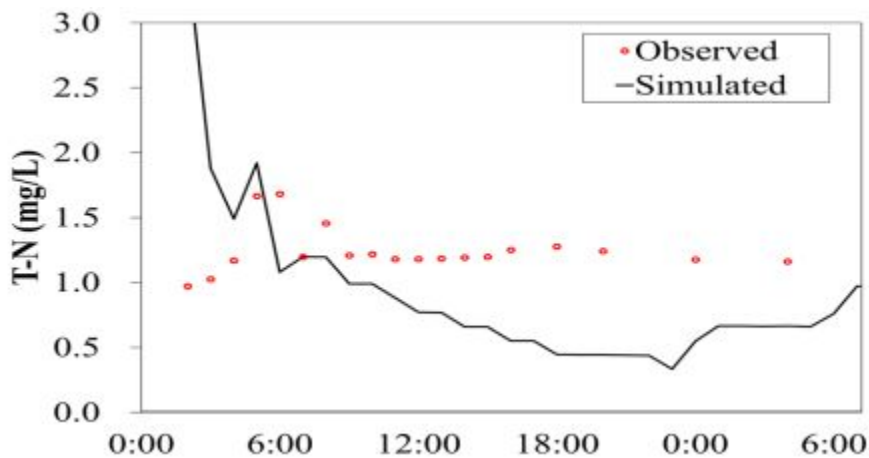
1-2 지점의 검보정 결과 Table 4.7와 같다. Table 3.4의 모형효율 평가기준으로 비교 하였을 때, 수온의 경우 % Difference는 0.04, O/S은 1.00으로 나타났으며, DO의 경우 % Difference는 -6.60, O/S은 0.94로 나타났다. BOD의 경우 % Difference는 -10.18, O/S은 1.11로 나타났으며, 영양염류 모의결과를 살펴보면 T-N의 경우 % difference 12.72, O/S 1.15로 산정 되었으며 T-P의 경우 % difference -13.55, O/S 0.88로 나타났다.

Table 4.7 Water Calibration results (1-2)

구분	1-2				
	수온 (℃)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
측정값(O)	20.53	8.39	0.52	1.24	0.008
모의값(S)	20.53	8.95	0.47	1.08	0.009
O/S	1.00	0.94	1.11	1.15	0.88
% difference	0.04	-6.60	-10.18	12.72	-13.55
모형효율	very good	very good	very good	very good	very good



<Fig. 4.13> Water Calibration results (WT, DO, BOD)(1-2)



<Fig. 4.14> Water Calibration results (T-N, T-P)(I-2)

3. PEST 결과

1) 유량 검보정 결과

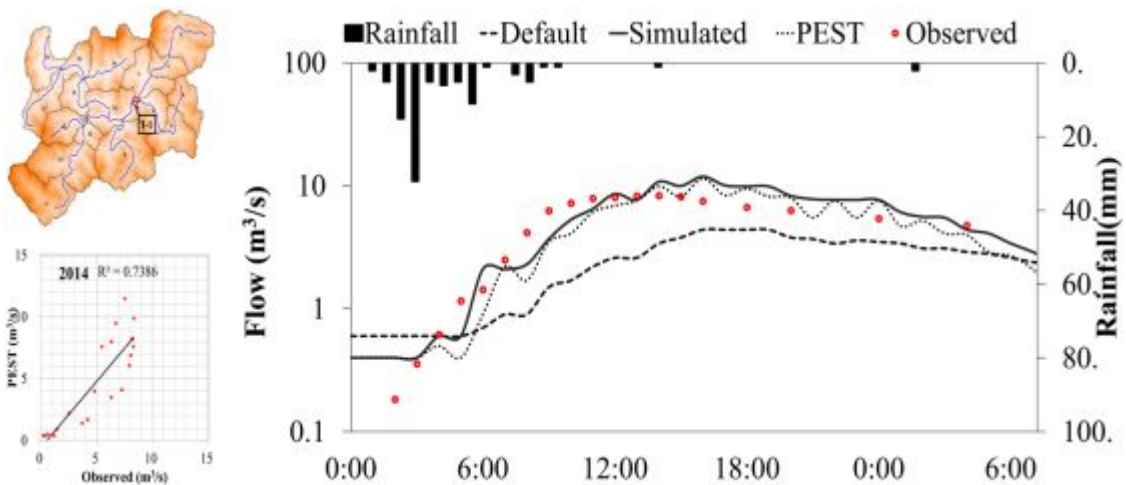
(1) I-1 결과

I-1 지점의 PEST 프로그램을 적용한 결과는 Table 4.8, <Fig 4.15>와 같다. % difference은 4.36로 “Very Good” 을 나타냈다. 또한 Simulated 모의결과와 비교해보면 PEST 적용결과 % difference가 더 높은 수준으로 모의되어 PEST 적용이 적합한 것으로 나타났다.

여기서 Default는 모형 초기의 최초의 출력데이터, Simulated는 시행착오법의 출력데이터, PEST는 자동 검보정 프로그램의 출력데이터, Observed는 실측데이터이다.

Table 4.8 I-1 PEST Calibration results (Flow)

구분	I-1				
	측정값(O)	모의값(S)	O/S	% difference	모형효율
Simulated	4.96	5.29	0.94	-6.63	Very Good
PEST	4.96	4.74	1.05	4.36	Very Good



<Fig. 4.15> I-1 PEST Calibration results (Flow)

Table 4.9 Flow parameters for PEST Calibration (I-1)

Parameter	unit	Typical range	Possible range	초기값	PEST 적용값		
					INT.	MIN.	MAX.
LZSN*	in	3.0 ~8.0	2.0 ~15.0	4.0 ~6.5	4.0 ~6.5	2.0	4.92 ~8.0
INFILT*	in/hr	0.01 ~0.25	0.001 ~0.5	0.16	0.03 ~0.15	0.01	0.25 ~0.3
KVARY	1/in	0.0 ~3.0	0.0 ~5.0	0	1	0	3
AGWRC	-	0.92 ~0.99	0.85 ~0.999	0.98	0.93	0.92	0.99
DEEPFR	-	0.0 ~2.0	0.0 ~0.5	0.1	0	0	0.5
BASETP	-	0.0 ~0.05	0.0 ~0.2	0.02	0.02	0.0	0.05
AGWETP	-	0.0 ~0.05	0.0 ~0.2	0	0	0	0.05
CPESC	in	0.03 ~0.2	0.01 ~0.4	0.1	0.1	0.03	0.2
UZSN*	in	0.1 ~1.0	0.05 ~2.0	1.128	0.06 ~0.1	0.05 0.083	0.8 ~1
NSUR*	-	0.15 ~0.35	0.05 ~0.5	0.2	0.1 ~0.37	0.1 ~0.37	0.14 ~0.5
INTFW	-	1.0 ~3.0	1.0 ~10.0	0.75	0.05	0.0	3.0
IRC	-	0.5 ~0.7	0.3 ~0.85	0.5	0.5	0.5	0.7
LZETP	-	0.2 ~0.7	0.1 ~0.9	0.1	0.1	0.1	0.7

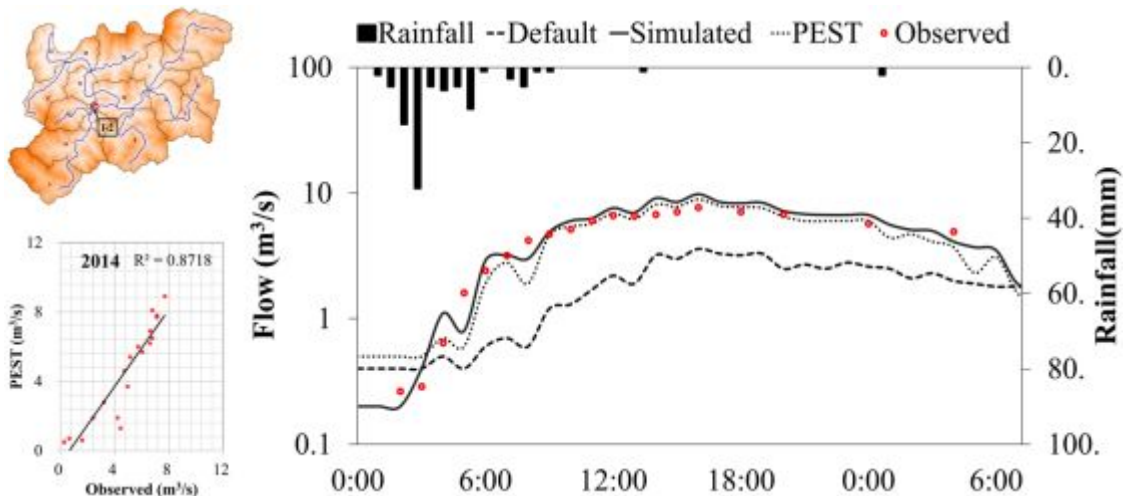
* 토지이용별 적용

(2) 1-2 결과

1-2 지점의 PEST 프로그램을 적용한 결과는 Table 4.10, <Fig 4.16>와 같다. % difference은 5.07로 “Very Good” 을 나타냈다. 또한 1-2지점도 마찬가지로 Simulated 모의결과와 비교해보면 PEST 적용결과의 % difference가 더 높은 수준으로 모의되어 PEST 적용이 적합한 것으로 나타났다.

Table 4.10 1-2 PEST Calibration results (Flow)

구분	1-2				
	측정값(O)	모의값(S)	O/S	% difference	모형효율
Simulated	4.62	4.95	0.93	-7.16	Very Good
PEST	4.62	4.39	1.05	5.07	Very Good



<Fig. 4.16> 1-2 PEST Calibration results (Flow)

Table 4.11 Flow parameters for PEST Calibration (1-2)

Parameter	unit	Typical range	Possible range	초기값	PEST 적용값		
					INT.	MIN.	MAX.
LZSN*	in	3.0 ~8.0	2.0 ~15.0	4.0 ~6.5	4.0 ~6.5	2.0	4.92 ~8.0
INFILT*	in/hr	0.01 ~0.25	0.001 ~0.5	0.16	0.01 ~0.09	0.01	0.25 ~0.3
KVARY	1/in	0.0 ~3.0	0.0 ~5.0	0	2.9	0	3.0
AGWRC	-	0.92 ~0.99	0.85 ~0.999	0.98	0.98	0.92	0.99
DEEPPFR	-	0.0 ~2.0	0.0 ~0.5	0.1	0	0	0.5
BASETP	-	0.0 ~0.05	0.0 ~0.2	0.02	0.02	0.0	0.05
AGWETP	-	0.0 ~0.05	0.0 ~0.2	0	0	0	0.05
CPESC	in	0.03 ~0.2	0.01 ~0.4	0.1	0.1	0.03	0.2
UZSN*	in	0.1 ~1.0	0.05 ~2.0	1.128	1.560 ~1.6	0.05 ~0.083	2
NSUR*	-	0.15 ~0.35	0.05 ~0.5	0.2	0.1 ~0.37	0.1 ~0.37	0.14 ~0.5
INTFW	-	1.0 ~3.0	1.0 ~10.0	0.75	0.35	0.0	3.0
IRC	-	0.5 ~0.7	0.3 ~0.85	0.5	0.5	0.5	0.7
LZETP	-	0.2 ~0.7	0.1 ~0.9	0.1	0.1	0.1	0.7

* 토지이용별 적용

2) 수질 검보정 결과

(1) I-1 결과

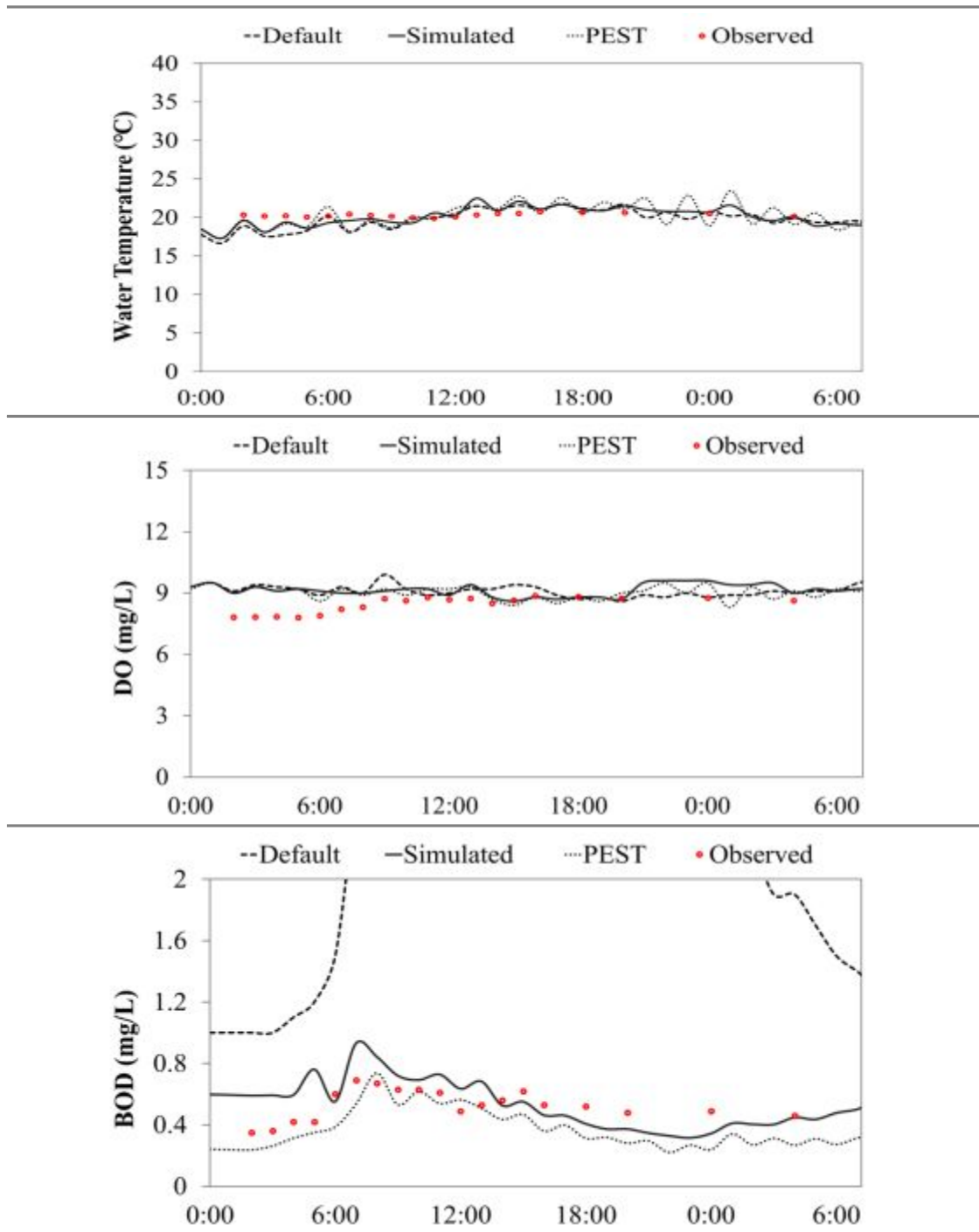
I-1 지점의 수온, DO, BOD, T-N, T-P, 등 5개 수질항목에 대하여 자동 검보정 프로그램(PEST)를 적용하였으며 그 결과를 Table 4.12, <Fig 4.17~18>에 나타내었다. 5개의 수질항목을 % difference로 평가한 결과 모든 항목에 걸쳐 대부분 “Very good” ~ “Good” 수준으로 나타났다.

수온은 % difference 1.72, O/S 0.93으로 “Very good” 수준으로 산정되었다. 유기물의 모의결과를 살펴보면 DO의 경우 % difference -7.00, O/S 0.93으로 “Very good” 수준으로 산정되었으며, BOD는 % difference 20.97, O/S 1.27로 “good” 수준으로 산정되었다.

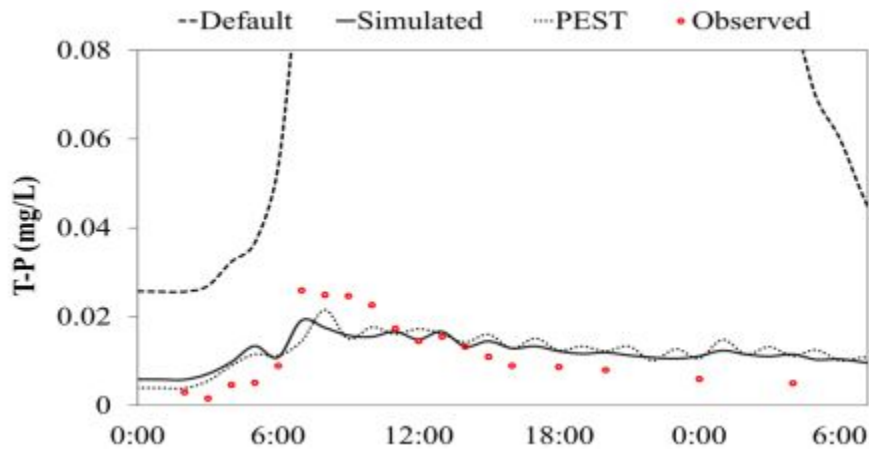
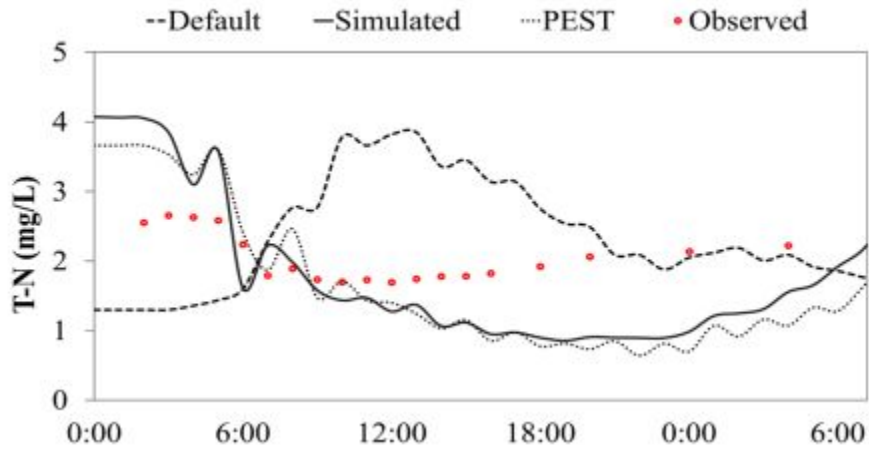
영양염류의 모의결과를 보면 T-N은 % difference 11.24, O/S는 1.13으로 “Very good” 수준으로 산정되었다. T-P의 경우 % difference -10.08, O/S 0.91로 “Very good” 수준으로 산정되었다.

Table 4.12 PEST Water calibration results (I-1)

구분	I-1				
	수온 (℃)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
측정값(O)	20.32	8.44	0.52	2.05	0.012
모의값(S)	19.97	9.03	0.41	1.82	0.013
O/S	1.02	0.93	1.27	1.13	0.91
% difference	1.72	-7.00	20.97	11.24	-10.08
모형효율	very good	very good	good	very good	very good



<Fig. 4.17> PEST Water calibration results (WT, DO, BOD)(1-1)



<Fig. 4.18> PEST Water calibration results (T-N, T-P)(I-1)

Table 4.13 Water parameters for PEST Calibration (1-1)

수질 항목	Parameter	unit	Typical range	초기값	PEST 적용값		
					INT.	MIN.	MAX.
BOD	KBOD20	/hr	0.001 ~0.14	0.004	0.1	0.001	0.125
	TCBOD	-	1~2	1.047	1.075	1	2
	KODSET	ft/hr	>0	0.027	0.027	0	1
T-P	BRP04 (1)	mg/m ² ·hr	>0	0	0	0	2
	BRP04 (2)	mg/m ² ·hr	>0	0	0	0	2
	ANAER	mg/L	0.0001 ~1.0	0.001	0.001	0.0001	1
T-N	BRNIT (1)	mg/m ² ·hr	>0	0	0	0	30
	BRNIT (2)	mg/m ² ·hr	>0	0	20	0	30
	KTAM20	/hr	0.004 ~0.042	0.015	0.015	0.001	2
	KN0220	/hr	0.008 ~0.083	0.002	0.002	0.001	2
	TCNIT	-	1~2	1.07	1.07	1	2
	KN0320	/hr	0.001 ~0.042	0.002	0.002	0.001	1
	TCDEN	-	1~2	1.04	1.04	1	2
	DENOXT	mg/L	>0	5	5	0	7

(2) 1-2 결과

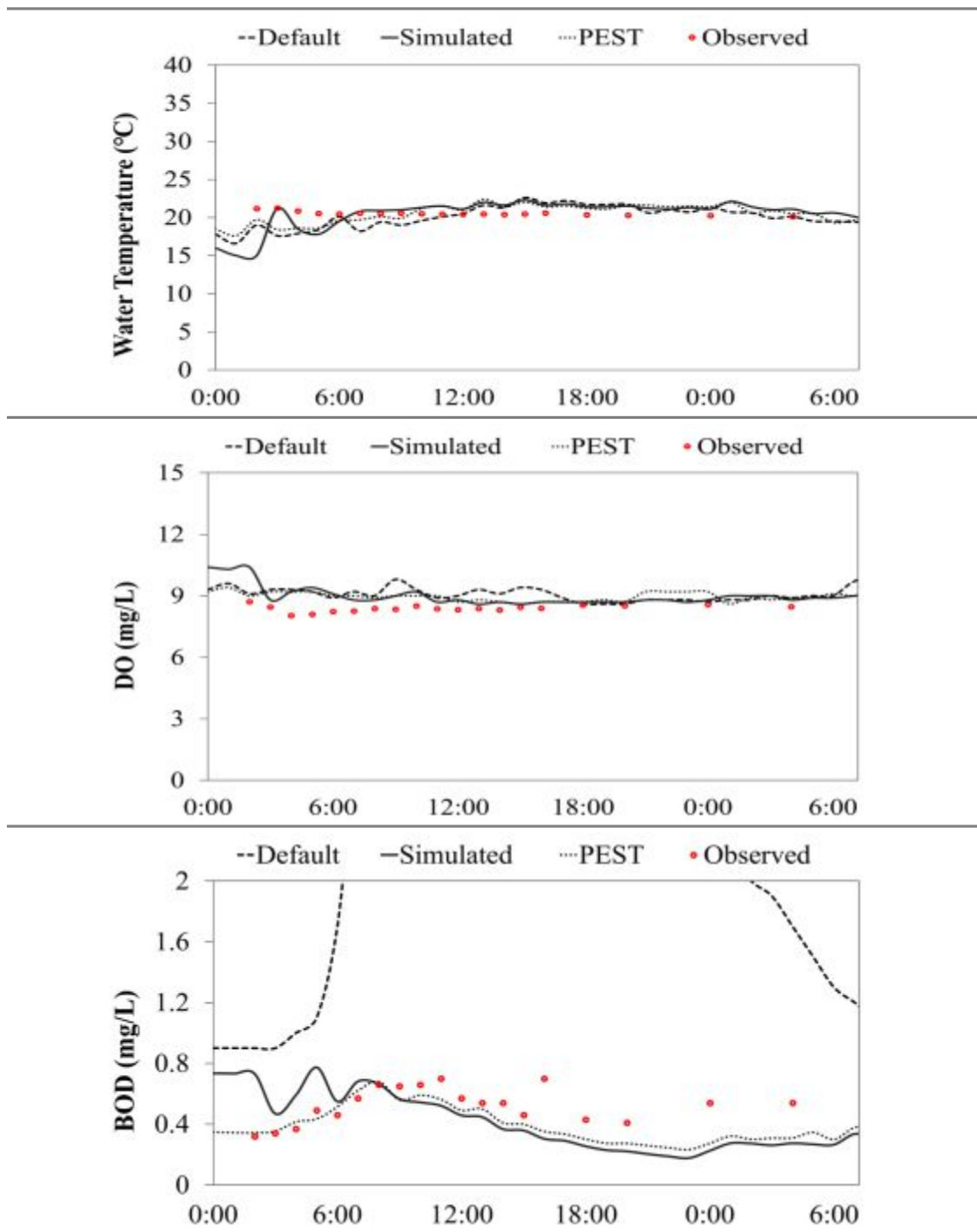
1-2 지점의 수온, DO, BOD, T-N, T-P, 등 5개 수질항목에 대하여 자동보정프로그램 (PEST)를 적용하였으며 그 결과를 Table 4.14, <Fig 4.19~20>에 나타내었다. 5개의 수질항목을 % difference로 평가한 결과 모든 항목에 걸쳐 대부분 “Very good” ~ “Good” 수준으로 판정되었다.

수온은 % difference 0.40, O/S 1.00으로 “Very good” 수준으로 산정되었다. 유기물의 모의결과를 살펴보면 DO의 경우 % difference -6.48, O/S 0.94로 “Very good” 수준으로 산정되었다. BOD는 % difference 15.46, O/S 1.18로 “good” 수준으로 산정되었다.

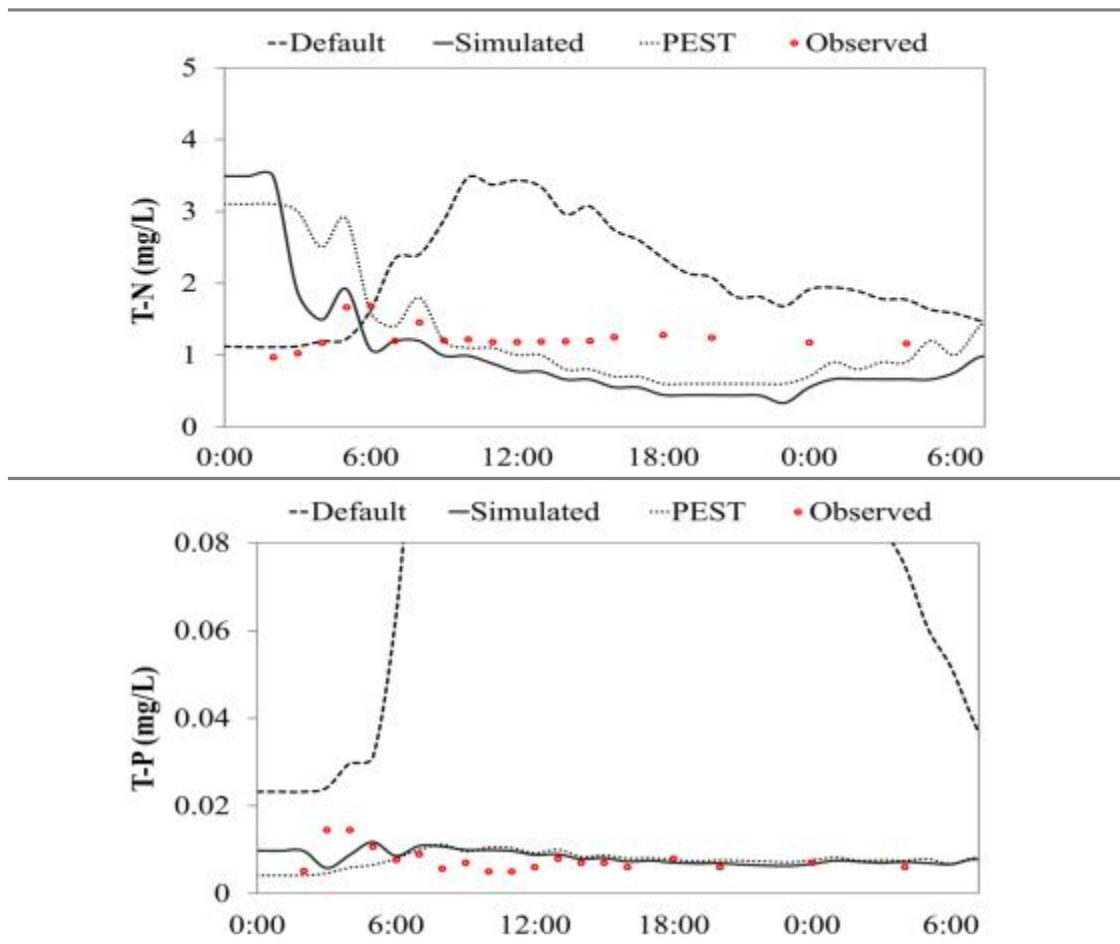
영양염류의 모의결과를 보면 T-N은 % difference -15.16, O/S는 0.87로 “good” 수준으로 산정되었으며, T-P의 경우 % difference -7.49, O/S 0.93으로 “Very good” 수준으로 산정되었다.

Table 4.14 PEST Water calibration results (1-2)

구분	1-2				
	수온 (°C)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
측정값(O)	20.53	8.39	0.52	1.24	0.008
모의값(S)	20.45	8.94	0.44	1.43	0.008
O/S	1.00	0.94	1.18	0.87	0.93
% difference	0.40	-6.48	15.46	-15.16	-7.49
모형효율	very good	very good	good	good	very good



<Fig. 4.19> PEST Water calibration results (WT, DO, BOD)(1-2)



<Fig. 4.20> PEST Water calibration results (T-N, T-P)(1-2)

Table 4.15 Water parameters for PEST Calibration (1-2)

수질 항목	Parameter	unit	Typical range	초기값	PEST 적용값		
					INT.	MIN.	MAX.
BOD	KBOD20	/hr	0.001 ~0.14	0.004	0.1	0.001	0.125
	TCBOD	-	1~2	1.047	1.075	1	2
	KODSET	ft/hr	>0	0.027	0.027	0	1
T-P	BRP04 (1)	mg/m ² ·hr	>0	0	0.001	0	10
	BRP04 (2)	mg/m ² ·hr	>0	0	0.001	0	10
	ANAER	mg/L	0.0001 ~1.0	0.001	0.001	0.0001	1
T-N	BRNIT (1)	mg/m ² ·hr	>0	0	0	0	30
	BRNIT (2)	mg/m ² ·hr	>0	0	10	0	30
	KTAM20	/hr	0.004 ~0.042	0.015	0.015	0.001	2
	KN0220	/hr	0.008 ~0.083	0.002	0.002	0.001	2
	TCNIT	-	1~2	1.07	1.07	1	2
	KN0320	/hr	0.001 ~0.042	0.002	0.002	0.001	1
	TCDEN	-	1~2	1.04	1.04	1	2
	DENOXT	mg/L	>0	5	5	0	7

V. 결론

부안댐 유역을 HSPF모형으로 구축하여 시행착오법과 PEST로 유량 검보정을 하였다. 결과는 모형효율이 둘다 Very Good으로 판정되었다. PEST 구축결과가 더 좋은 결과가 나타났다. 수질 검보정 결과는 시행착오법의 모형효율은 모두 Very Good이며, PEST의 모형효율은 BOD, T-N에서는 Good으로 판정되어 수질에서는 시행착오법이 더 좋은 결과가 나타났다.

시행착오법은 매개변수를 사용자가 조정하여 반복하여 검보정을 시행하여 하므로 속도 및 많은 시간이 필요하다. PEST는 Observed data의 입력 및 Parameter의 종류와 범위 설정 등이 자동보정모듈로서 과학적이고 신뢰성 있는 검보정 결과로 시행착오법의 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다. PEST와 시행착오법을 연계해서 사용하여 검보정 시간 단축 및 신뢰성 있는 결과를 나타낼 수 있다.

【참고문헌】

1. 환경부, “4대강 비점오염원관리 종합대책 수립, 2006.
2. 권현각, 나승민, 신동석, 임태효, “금호강 유입 지천의 비점오염원 유달을 산정에 관한 연구”, J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 16, No. 4, (pp. 303~311), (Aug. 2016).
3. 김진해, “지속적이고 효율적인 상수원보호구역 관리방안에 관한 연구”, 연세대학교 보건환경대학원, 2010.
4. 김진원, “3차원 수질예측을 위한 3개 수계 유역모형 및 4개 댐 수리수질모형 구축조사 연구”, 수자원공사, 2004.
5. 박태원, “HSPF를 이용한 낙동강유역에서의 비점오염원 정량분석”, 경북대학교, 2012.
6. 환경부, “환경영향예측모델 활용지침 마련을 위한 연구”, 2007.
7. Donigian, Jr., A.S. 2000. 『HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture #19, Calibraion and Verification Issures, Slide #L19-22 EPA Headquarters』. Washington Information Center, 10-14 January, 2000. Presented and prepared for US EPA, Office of Science and Technology, Washington, D.C.
8. 환경부, “수질오염총량관리를 위한 유역관리모델 적용방안 연구”, 2010
9. 국립환경과학원, “수질예측 정확도 향상을 위한 HSPF 모델 개선”, 2012
10. Doherty, J., “PEST: Model independent parameter estimation. fifth edition of user manual.” Watermark Numerical Computing, Brisbane Australia, 2005.

11. 양원모, “BASINS/HSPF를 이용한 강우시 감돈저수지 유역 모델링에 관한 연구”, 전남대학교, 2007.
12. 신아현, “BASINS/WinHSPF를 이용한 충주댐 유역의 댐 모의 및 비점오염 저감방안 연구”, 건국대학교, 2008.
13. 전상완, “HSPF와 SWAT을 이용한 이동저수지 유역의 유출량 비교”, 건국대학교, 2009.
14. 최재훈, “유역모델(HSPF)을 이용한 댐유역 비점오염부하량 산정방법의 개선에 관한 연구”, 충남대학교, 2010.
15. 황보현, “유역의 규모를 고려한 HSPF 모형의 적용성 평가, 경북대학교, 2011.
16. 김광문, “HSPF와 EFDC을 이용한 보 설치 전·후의 수리 및 수질 변화 분석”, 경북대학교, 2012
17. 정유진, “복합토지이용유역에서 HSPF 및 SWMM 모델을 이용한 비점오염부하량 산정”, 건국대학교, 2014.
18. 강성준, “하천형상을 반영한 HSPF모델의 구축 및 수질개선효과 평가기법 연구”, 건국대학교, 2016.
19. 김태일, “HSPF/PEST 연계적용을 통한 낙동강유역 HSPF수문보정인자 고찰”, 안동대학교, 2011.
20. 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, pp 75-86

21. 최동호, HSPF와 SWAT 모형의 자동보정기능을 적용한 농촌유역 오염부하 추정, 전남대학교, 2012.
22. 전라북도, “직소천 하천정비계획”, 2007.
23. 전라북도, “백천 하천정비계획”, 2011.
24. 수자원공사, 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.or.kr).
25. 기상청, www.kma.go.kr.
26. 이승창, 신동철, 부재 최적화 설계에서 유전자 알고리즘과 시행착오법의 성능비교, 대한건축학회 논문집, 25(10), pp. 3-10, 2009.
27. US EPA, 2000. BASINS Technical Note 6 ; Estimating hydrology and hydraulic parameters for HSPF, EPA-823-R00-012.
28. 장성호 등, “남천에서의 강우시 비점오염물질의 유출특성”, 한국환경보건학회지, 31(1), pp1-6, 2005.
29. 이호준 등, “토지이용이 이원천 유역의 하천수질에 미치는 영향”, 한국생태학회지, 22(5), 235-240, 1999.
30. 신영규, “대관령 지역의 산림 소유역과 농경지 소유역의 수질비교”, 대한지리학회지, 39(4), pp544-561, 2004.
31. 박종관, “SRC Method에 의한 산지 소유역의 부유토사 유출량 산정”, 한국지형학회지, 1, pp17-31, 1997.

32. 오영택 등, “강우시 소옥천의 비점오염원 유출 특성”, 한국수질보전학회지, 20(6), pp657-663, 2004.

33. US EPA 2001. 『Better assessment science integrating point and nonpoint-sources: BASINS version 3.0 user' s manual』. EPA-832-F-01-021, US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.