



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

SWMM 5를 이용한 조만강의
유출 및 수질모의



2009년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

이 동 엽

공 학 석 사 학 위 논 문

SWMM 5를 이용한 조만강의 유출 및 수질모의

지도교수 이 상 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2009년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

이 동 엽

이동엽의 공학석사 학위논문을 인준함.

2009년 2월 25일



주 심 농 공 학 박 사 이 영 대 (인)

위 원 공 학 박 사 이 종 섭 (인)

위 원 공 학 박 사 이 상 호 (인)

목 차

표 목차	viii
그림 목차	x
기호 목록	xiii
Abstract	xvi

1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 기존 연구	2
1.3 연구의 내용 및 범위	2
2. 유역의 유출 및 수질모의 모형	4
2.1 도시유출 및 수질 모형의 선정과 SWMM	4
2.2 SWMM의 기본구조	5
2.2.1 RUNOFF 블록	8
2.2.2 EXTRAN 블록	16
2.2.3 STORAGE-TREATMENT 블록	20
3. 모형의 적용	22
3.1 대상유역의 현황 및 특성	22
3.1.1 조만강유역의 일반 현황	22
3.1.2 합류식 하수관거 현황	25
3.1.3 화목·장유 하수처리장 현황	26

목 차(계속)

3.2 모형 입력자료 구성	26
3.2.1 유역 분할	26
3.2.2 유역 입력자료	28
3.2.3 유역의 급수량 산정	30
3.2.4 유역의 지형 및 토지이용 분석	33
3.3 수질 모의 입력자료	36
3.3.1 축적(buildup)	36
3.3.2 유실(washoff)	38
3.3.3 하수처리 함수	41
3.4 자료수집	41
3.4.1 기상자료	41
3.4.2 유량 및 수질자료	42
3.4.3 환경부 수질 측정망 자료	45
3.4.4 화목, 장유 하수처리장의 오염물질 처리율	46
4. 하수처리장을 고려한 조만강의 수질모의	47
4.1 조만강유역의 유출모식도 작성	47
4.2 매개변수의 민감도 분석	48
4.3 모형 보정 및 검증	57
4.3.1 모형 보정	57
4.3.2 모형 검증	64
4.4 하수처리장을 고려한 유출 및 수질모의	66
4.4.1 통계량 분석	66
4.4.2 화목하수처리장의 수질모의	67

목 차(계속)

4.4.3 장유하수처리장의 수질모의	70
4.5 하수처리장 증설 계획을 반영한 수질모의	73
4.5.1 하수처리장 증설계획	73
4.5.2 증설계획을 고려한 하수처리장의 수질모의	75
4.5.3 조만강하구의 수질에 대한 영향	79
5. 결론 및 향후 연구과제	83
5.1 결론	83
5.2 향후 연구과제	84



표 목차

표 2.1 유출 및 수질 모형들의 적용성 검토	5
표 2.2 지표유출에 대한 Manning 조도계수 추정값의 표	11
표 3.1 조만강수계 구성	24
표 3.2 조만강유역의 공공하수처리시설 현황	26
표 3.3 소유역별 입력자료	29
표 3.4 행정구역별 급수인구	31
표 3.5 조만강유역의 소유역별 급수량 산정	32
표 3.6 조만강유역의 토지이용형태별 면적	35
표 3.7 토지이용코드	35
표 3.8 오염물 축적량 산정의 형태	36
표 3.9 매개변수 추정값	40
표 3.10 하수처리함수의 예	41
표 3.11 조만강유역 인근의 가용한 강우관측소 현황	42
표 3.12 유량, 수질 측정장비	44
표 3.13 하수처리장 모의에 사용된 오염물질 처리율	46
표 4.1 SWMM의 유역 및 하도/관망 매개변수	49
표 4.2 SWMM의 지하수 매개변수	50
표 4.3 SWMM의 수질모의 매개변수	51
표 4.4 조만강유역의 측정, 가용자료 및 보정 요소	57
표 4.5 해반천의 수질모의 결과 분석	58
표 4.6 조만강 상류의 수질모의 결과 분석	60
표 4.7 조만강 하구의 수질모의 결과 분석	62
표 4.8 화목, 장유하수처리장의 수질모의 결과의 통계량	72
표 4.9 화목하수처리장의 시설용량 및 증설계획	73

표 목차(계속)

표 4.10 장유하수처리장의 시설용량 및 증설계획	74
표 4.11 하수처리장증설에 따른 방류수 농도저감률	76
표 4.12 하수처리장 증설에 따른 조만강하구의 오염물질별 저감률	79



그림 목차

그림 2.1 SWMM 블록간 상호관계	7
그림 2.2 불규칙 유역 형상	9
그림 2.3 유역 경사와 지표면 저류량의 관계	13
그림 2.4 소유역의 비선형 저류지 모형	13
그림 2.5 소유역의 개념화된 면적분리	13
그림 3.1 조만강수계 모식도	23
그림 3.2 조만강유역의 합류식 하수관거 간선망도	25
그림 3.3 조만강유역의 하수간선망을 고려한 소유역 분할	27
그림 3.4 배수체계의 개념도	30
그림 3.5 소유별 급수량 산정	31
그림 3.6 조만강유역의 DEM 분석	34
그림 3.7 조만강유역의 토지이용분석	34
그림 3.8 김해공항기상대의 시간단위 강우주상도	42
그림 3.9 조만강유역의 측정지점	43
그림 3.10 환경부 수질측정망 서낙동강 3 지점의 수질그래프	45
그림 4.1 조만강유역의 유출모식도	47
그림 4.2 총 유출량에 대한 유역 및 하도/관망 매개변수의 민감도	52
그림 4.3 침투유량에 대한 유역 및 하도/관망 매개변수의 민감도	52
그림 4.4 총 지하수 유출량에 대한 대수층 매개변수의 민감도	53
그림 4.5 침투 지하수 유출량에 대한 대수층 매개변수의 민감도	53
그림 4.6 총 지하수 유출량에 대한 지하수 흐름 매개변수의 민감도	54
그림 4.7 침투 지하수 유출량에 대한 지하수 흐름 매개변수의 민감도	54
그림 4.8 총 오염물 부하에 대한 수질모의 매개변수의 민감도	56
그림 4.9 최대 오염물 농도에 대한 수질모의 매개변수의 민감도	56

그림 목차(계속)

그림 4.10 해반천유역의 유출 수문곡선	58
그림 4.11 해반천의 수질모의 곡선	59
그림 4.12 조만강 상류 마찰교 지점의 유출 수문곡선	60
그림 4.13 조만강 상류 마찰교지점의 수질모의 곡선	61
그림 4.14 조만강 하구의 유출 수문곡선	62
그림 4.15 조만강하구의 수질모의 곡선	63
그림 4.16 측점 1(해반천)의 유출모의 검증곡선	64
그림 4.17 측점 1(해반천)의 수질모의 검증곡선	65
그림 4.18 화목하수처리장의 BOD모의곡선	67
그림 4.19 화목하수처리장의 COD모의곡선	68
그림 4.20 화목하수처리장의 TN모의곡선	68
그림 4.21 화목하수처리장의 TP모의곡선	69
그림 4.22 화목하수처리장의 TSS모의곡선	69
그림 4.23 장유하수처리장의 BOD모의곡선	70
그림 4.24 장유하수처리장의 COD모의곡선	70
그림 4.25 장유하수처리장의 TN모의곡선	71
그림 4.26 장유하수처리장의 TP모의곡선	71
그림 4.27 장유하수처리장의 TSS모의곡선	72
그림 4.28 화목하수처리장의 현재하수처리용량과 증설후의 하수처리용량	74
그림 4.29 장유하수처리장의 현재하수처리용량과 증설후의 하수처리용량	75
그림 4.30 화목하수처리장의 증설에 따른 BOD농도변화	76

그림 목차(계속)

그림 4.31 화목하수처리장의 증설에 따른 COD농도변화	77
그림 4.32 화목하수처리장의 증설에 따른 TN농도변화	77
그림 4.33 화목하수처리장의 증설에 따른 TP농도변화	78
그림 4.34 화목하수처리장의 증설에 따른 TSS 농도변화	78
그림 4.35 측점 3(조만강하구)의 화목하수처리장 증설에 따른 BOD 농도변화	80
그림 4.36 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른 COD농도변화	80
그림 4.37 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른 TN농도변화	81
그림 4.38 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른 TP농도변화	81
그림 4.39 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른 TSS농도변화	82



기호 목록

Latin Uppercase

A	소유역면적(ha)
C	오염물농도(mg/L)
DD	오염물질 발생량(kg)
DDFACT	오염물질 축적 계수
DDLIM	오염물질 축적 한계량(kg)
DDPOW	오염물질 축적 지수
H	수심(m)
$\bar{I}$	저수지의 평균 유입률(m^3/sec)
K	오염물의 감쇠계수(sec^{-1})
L	주수로의 길이(m)
NSE	효율성 지수
PBIAS	평균편차의 비율(%)
POFF	오염물질 유실량(kg)
Q	유출량(m^3)
$\bar{Q}$	저수지의 평균 유출률(m^3/sec)
R	오염물질 제거율
RCOEF	오염물질 유실계수
RMSE	제공근 평균오차(mg/L)
S	유역경사(%)
S_f	마찰경사
S_k	왜곡도계수

기호 목록 (계속)

V	비선형 저류지내 물의 체적(m^3)
W	유역폭(m)

Latin Lowercase

a	kinematic wave 계수
d	수심(m)
d_p	지표면저류 깊이(mm)
d_1	t시간에서 수심
d_2	$t+\Delta t$ 시간에서 수심
g	중력가속도
i^*	초과강우량(m/sec)
$k(=r \times RCOEF)$	오염물질 유실지수
m	kinematic wave 계수
n	Manning 조도계수
q_L	단위폭당유량(m^3/sec)
r	유출률(mm/hr)
t_c	도달시간

기호 목록 (계속)

Greek Uppercase

Δd	수심 변화율
Δt	시간 변화율
ΔV	저수지 저류량 변동률



Dong Yeop Lee

Department of Civil Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

To plan the water quality improvement of rivers, quantification of runoff and water quality should be preceded first. The quantification of runoff and water quality can be implemented by measuring the flow and water quality or by long-term simulation of runoff and water quality. The purpose of this paper is to quantify the runoff and water quality through long-term runoff and water quality simulation that considered combined sewer over flow and sewage treatment plant based on Jomangang (river), the biggest tributary to a national river, Seonakdonggang (river). Another purpose is to evaluate the water treatment effect according to the extension of sewage treatment plants comparing the water quality simulation result of the existing sewage treatment plants with that of the sewage treatment plants to be extended. As a result, the runoff and water quality model of Jomangang watershed that is divided into 37 small drainage basins had been build and in that model, combined sewer over flow and sewage treatment plants are included. After the sensitivity analysis of the model parameters, flow and water quality measurement data were used in the model calibration and verification. Also, the runoff and water quality simulation which considered the sewage treatment plants were corrected by using the data of the quality of water discharged, the calibration accuracy

was evaluated by statistic. The simulation results reflecting the extension plan for the treatment volume of the sewage treatment plants were compared with that of the present sewage treatment plants.



1. 서론

1.1 연구배경

하천 수질 오염의 원인은 생활하수, 공업하수, 분뇨 등의 점오염원(point sources)과 강우 시 지표면에서 빗물에 의한 쓸림 현상으로 맨홀 등으로 유입하여 하수관을 따라 하천으로 흐르는 비점오염원(nonpoint sources) 등이 있다.

이러한 하천 오염의 원인 중 비점오염원에 의한 오염은 점점 커져가는 양상이다. 그 이유는 도시유역이, 지속적인 개발로 인해 불투수율이 증가하고 유달시간이 짧아짐에 따라 강우초기에 고농도의 오염물질이 다량 유출되는 특성을 가진 유역으로 변화되기 때문이다.

한편 이 연구의 대상 지역인 조만강 하구의 목표기준 수질은 '좋음(Ib)'으로 2015년까지 달성을 목표로 설정되어 있다(환경부 2007년 고시). 그러나 목표기준 수질과 조만강 하구의 연평균수질을 비교하면 목표기준을 만족하지 못하고 있다. 예로서 TN(총질소)의 목표 수질은 0.3 mg/L 이하인데 조만강 하구의 연평균 TN의 농도는 5.9 mg/L이다. 이에 따라 수질개선 방안 마련을 위한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

하천의 수질개선 방안 마련을 위해서는 유역의 유출 및 수질의 정량화가 선행되어야 한다. 유출 및 수질의 정량화는 유량과 수질의 측정 또는 유역의 장기 유출 및 수질모의로 수행될 수 있는데, 이 논문은 국가하천인 서낙동강의 최대 지류인 조만강을 대상으로 합류식 하수관거, 하수처리장 등을 고려한 장기 유출 및 수질 모의를 통해 유출 및 수질을 정량화 하는데 목적이 있다.

그리고 현존하는 하수처리장의 수질 모의 결과와 증설될 하수처리장의 수질 모의 결과를 비교하여 하수처리장의 증설에 따른 수처리 효율을 평

가하고자 한다.

1.2 기존 연구

국외의 연구사례로서, Wang(1996)은 미 육군 공병단의 시계열 자료 관리 시스템을 SWMM의 연속유출에 결합하여 모의하였다. William(2004)은 지리정보시스템(Geographic Information Systems; GIS)과 SWMM을 이용하여 수량과 수질을 모의하였다. 그리고 Nix와 Heaney(1988)는 유역의 장기(長期)거동의 관점에서 SWMM의 RUNOFF 블록과 STORAGE-TREATMENT 블록을 결합하여 가상유역으로부터 우수지로 유입되는 오염물질 제거를 모의하였다.

국내의 연구로서, 이종태 등(1996)은 SWMM의 세 블록(RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN)을 사용하여 남가좌동과 신정 유역에서 하도와 관거를 결합한 유출량을 모의하여 모형의 특성과 각 블록의 기능 등을 파악하였다. 이상호와 이정민(2006)은 안양천의 지류인 도림천에 강우, 증발량, 지표유출, 지하수유출 및 하수관망을 포함하여 도시유출 연속모의 및 수문 순환 모의를 연구하였다. 또한 이은주(2006)는 조만강의 지류인 해반천 유역에 SWMM을 적용하여 수문 및 수질변화를 모의하였으나 하수관거를 고려하지는 않았다. 장주영(2006)은 SWMM의 flow divider기능을 사용하여 온천천유역의 합류식 하수관거를 고려한 유출 및 수질 모의를 수행한 사례가 있으나 하수처리시설을 고려하지는 않았다. 그리고 이은주(2006)와 장주영(2006)의 연구는 생활용수와 농업용수의 공급량을 고려하지 않은 한계가 있다.

1.3 연구의 내용 및 범위

앞서 제시한 국내 연구들의 한계를 세 가지로 요약하면 다음과 같다.

첫째, 합류식 하수관거의 입력 여부가 불명확하다. 둘째, 하수처리시설의 모의 사례는 없다. 셋째, 유역 용수공급량의 고려가 없다.

위와 같은 한계를 극복하기 위하여 이 논문에서는 합류식 하수관거의 말단에 위치한 차집 관거를 웨어(weir) 연결 기능을 사용하여 모형에 입력 하였으며 조만강 유역 내에 있는 두 개의 하수 처리장을 입력하여 유역의 유출과 수질을 모의하였다. 모의한 오염물질은 BOD, COD, TN, TP, TSS이다.

또한 모형의 정확도를 높이기 위하여 소유역별 급수인구를 산정한 후 급수량을 추정하여 그 중 회귀량을 입력하였다. 농업용수 사용량은 일부 소유역에서 손실량만을 추정하여 입력하였고 공업용수는 연구대상 유역에서 고려하지 않았다.



2. 유역의 유출 및 수질모의 모형

2.1 도시유출 및 수질 모형의 선정과 SWMM

1970년대에 들어서 많은 기술자들 사이에서 도시 유출 및 수질 문제에 대한 관심이 증대되었고 이 문제를 정립하거나 적절한 설계지침을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 그 결과 도시 유역의 유출 및 수질 현상의 해석과 배수체계 설계를 위한 많은 모형들이 만들어졌으며 SWMM, HSPF, ILLUDAS, SWAT(Arnold 등, 2002) 모형 등이 그 예이다.

그 중 SWMM 모형은 1971년 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 지원 아래 Metcalf & Eddy사가 Florida 대학 및 WRE와의 공동 연구로 도시유역 하수시스템의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발한 모형이다(Huber and Dickinson, 1992). SWMM 모형은 도시유역에서 강우 및 증발산량에 의한 지표 유출 및 지하수 유출, 수질모의, 배수관망 내의 유출량 추적, 저류량 산정 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

한편 대상 유역에 적용할 모형의 선정에서 고려할 점은 연구의 목적, 가용자료의 수준, 모형의 취득 가능성 등이다. 이 연구에는 우기와 건기를 모두 모형화할 수 있는 유출 및 수질 모형이 필요하므로 SWMM이 적합하다.

그 이유를 두 가지로 들어보면 첫째, 연구의 목표와 조만강유역의 특성을 고려하여 비교한 모형의 적용성이 다른 모형에 비해 우수하기 때문이다(표 2.1; 이정민, 2007). 둘째, 공용(public) 프로그램으로 우리나라에 적용된 사례가 많다. 위와 같은 사유로 국내의 수문환경에 대한 적용에서 우수한 SWMM을 이 연구에서 선택하여 적용하였다.

표 2.1 유출 및 수질 모형들의 적용성 검토(우수> 양호> 가능> 부분적 가능> 부적당> 불량)

모형 이름	특징	적용성 검토 항목							
		연속 유출 모의	증발 고려	침투 모의	지표 · 지하 유출 모의	하도 유출	관거 유출 모의 · 설계	용설 모의	수질 모의
HSPF	유출 및 오염부하량/ 영양물질모의	가능	양호	양호	양호	양호	부적당	가능	부분적 가능
ILLUDAS	도시관망해석 기능 우수	부적당	부적당	가능	부분적 가능	양호	양호	부적당	부적당
SWAT	토지이용 변화에 따른 유출모의	가능	양호	양호	양호	양호	부적당	가능	가능
SWMM	도시통합 유역 모형	가능	양호	양호	가능	양호	우수	가능	가능

2.2 SWMM의 기본구조

SWMM에 대하여 이정민(2007)의 문헌에서 기술한 내용을 발췌하면 다음과 같다. SWMM은 강우에 의한 유출과 수질을 예측하기 위해 강우 주상도, 기상 입력자료, 소유역이나 하수 관로와 같은 시스템의 특성을 고려하여 실제 호우사상을 모의하도록 되어있으며, 단일·연속강우에 의한 모의가 가능하고 유출 및 오염물질농도곡선의 시간간격을 임의로 조절할 수 있다. 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의조절이 가능하다. 그

리고 소(小)배수유역에서 대(大)배수유역까지 적용이 가능하며 최대 2000개의 소유역, 수로·관로를 구성할 수 있다. 또한, 배수유역은 합성 및 분리가 가능하다. 유출은 강우와 용설로 발생하고 비선형 저류방정식을 기본방정식으로 사용하며, 침투량 산정에는 Horton, Green-Ampt 식 또는 SCS CN방법을 사용한다. 저류추정방법은 수표면이 평행하다고 가정한 수정 pulse 방법을 사용한다.

1981년에는 SWMM 모형 내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 모형에 포함시켜 보완시켰다. 그리고 1987년에는 지하수 유출을 모의하기 위하여 GROUND 부 프로그램을 추가하였다. 요약하면, SWMM 모형은 도시유역 내에서 우기 및 건기의 지표유출과 지하수 유출, 배수관망내의 유출량 추적, 수질모의, 오염물질에 대한 처리와 비용 계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

SWMM모형은 그림 2.1과 같이 RUNOFF 블록, TRANSPORT 블록, EXTRAN 블록, STORAGE-TREATMENT 블록의 4개의 실행블록과 RAIN 블록, TEMPERATURE 블록, COMBINE 블록, STATISTICS 블록 등의 6개의 보조블록들로 구성되어 있으며, 126개의 부 프로그램들을 포함하고 있다.

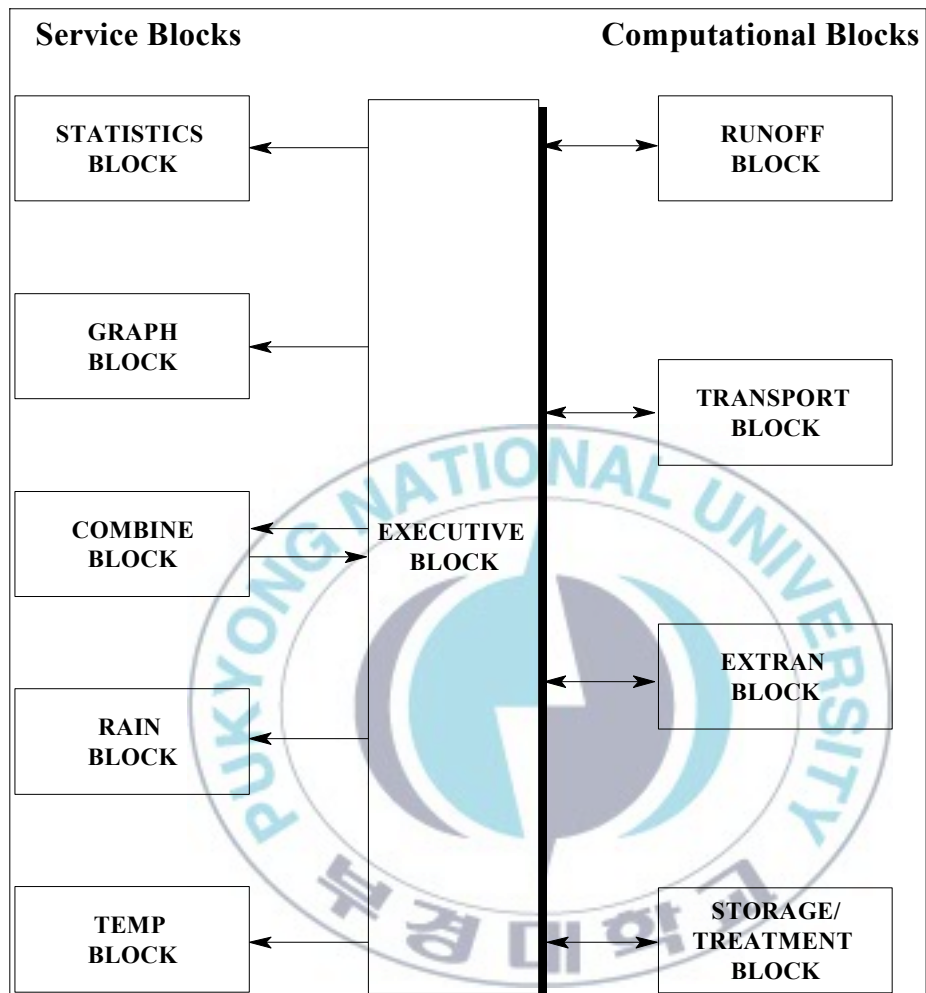


그림 2.1 SWMM 블록간 상호관계(Huber and Dickinson, 1992)

2.2.1 RUNOFF 블록

RUNOFF 블록은 배수 유역의 유출량과 수질 그리고 하수관거로 유입되는 유량 및 오염물질을 모의 하도록 개발되었다. 이는 단순화된 유역, 수로, 관로의 결합으로 유역을 표현한다.

또한 임의의 강우 또는 강설 주상도를 받아들여서 용설, 투수면적 내의 침투 손실, 표면 저류, 지표수 흐름, 수로 흐름, 절점(nodes)으로 유입되는 성분, 다수의 유출곡선과 오염물 곡선의 계산을 단계별로 계산·정리한다.

1) RUNOFF 블록의 지표유출 개념

① 도달시간(t_c)

RUNOFF 블록은 지표유출의 도달시간 산정에 kinematic wave 공식(Eagleson, 1970)을 사용한다. 하지만 이는 단일 유역에 대한 도달 시간만을 산정하기 때문에 RUNOFF 블록에서 유역의 유출량을 계산하기 위하여 유역을 분할/합성 할 경우 각 유역의 특성들을 포괄할 수 있도록 주의 깊은 분할/합성을 실시해야한다. 도달시간 산정식은 식 2.1과 같다.

$$t_c = \left(\frac{L}{a \cdot i^{*m-1}} \right)^{1/m} \quad (2.1)$$

여기서, t_c 는 도달시간(sec), L 은 주수로(main drainage channer)의 길이(m), i^* 는 초과강우량(m/sec), a 와 m 은 kinematic wave 계수이다. Kinematic wave식은 소유역에서 단위폭당 유출을 다음과 같이 가정한다(식 2.2).

$$q_L = a \cdot d^m \quad (2.2)$$

여기서, q_L 은 단위폭당 유량(m^3/sec), d 는 수심 (m)이며, a 와 m 인자는 등류 흐름으로 가정한 Manning식으로 계산한다(식 2.3).

$$a = \frac{1.49}{n} \cdot S^{1/2} \quad (2.3)$$

여기서, $m = \frac{5}{3}$

도달시간(t_c)은 강우강도의 영향 받는다. 강우강도가 증가하면 도달시간이 감소하게 된다. 이때, 도달시간은 유입량이 유출량과 같아지는 평형상태의 시간을 나타내며, 유역의 유출이 유역 출구에 도달하는데 걸리는 시간이다.

② 유역폭

SWMM은 지표수 흐름이 개념화된 직사각형 유역에서 일어나는 것으로 가정한다. 하지만 실제 유역의 형상은 대칭적이고 균등한 특성을 지닌 직사각형의 형태가 아니므로 유역폭을 산정할수 있는 절차가 요구된다. 간단한 조작 방법은 아래와 같다.

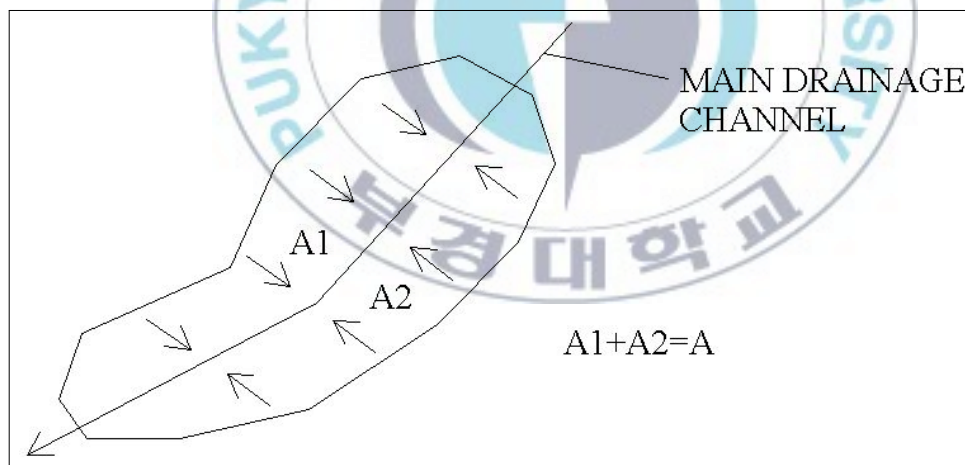


그림 2.2 불규칙 유역 형상

그림 2.2의 불규칙 유역 형상에서 왜곡도계수(S_k)는 다음과 같다(식

2.4).

$$S_k = \frac{|A_2 - A_1|}{A} \quad (2.4)$$

여기서, S_k 는 왜곡도 계수, A_1 은 유역의 한쪽면적, A_2 는 유역의 다른 한쪽 면적, A 는 전체유역의 면적이다.

$$W = (2 - S_k) \cdot L \quad (2.5)$$

유역폭 W 는 식 2.5에 의해 구할 수 있으며 이때, L 은 주수로(관로)의 길이이다.

유역과 소유역의 면적은 지형도에서 나누어진 배수 유역에 의해 산정된다. 유역 면적의 산정에서 면적의 상한, 하한의 크기는 제한되어 있지 않지만 유역에서 계산된 유출량이 강우체적 보다 많을 때 주의해야 한다.

③ 조도계수

지표면은 다양한 피복상태로 인하여 수로의 경우와 같은 일반적인 조도계수 값이 주어지지 않는다. 그러나 대부분의 경우 조도계수 값은 지표면의 피복상태, 유출깊이, 유량 또는 레이놀즈수에 영향을 받아 결정된다. Crawford and Linsley(1966)와 Engman(1986)은 주어진 지표면 피복상태에 대한 조도계수 n 값이 유출깊이에 반비례하여 변화하고 유량 또는 레이놀즈수에 의한 영향을 받는 것을 규명했고 일반적인 값을 추정하여 제시하였다(표 2.2).

표 2.2 지표유출에 대한 Manning 조도계수 추정값의 표

Source	Ground Cover	n	Range
Crawford and Linsley (1966)	Smooth Asphalt	0.012	
	Asphalt of concrete paving	0.014	
	Packed clay	0.03	
	Light turf	0.2	
	Dense turf	0.35	
	Dense shrubbery and forest litter	0.4	
Engman (1986)	Concrete or asphalt		0.01-0.013
	Bare sand		0.01-0.016
	Graveled surface		0.012-0.03
	Bare clay-loam (eroded)		0.012-0.03
	Range (natural)		0.01-0.32
	Bluegrass sod		0.39-0.63
	Short grass pairie		0.10-0.20
	Bermuda grass		0.30-0.48

④ 불투수율

소유역의 불투수율은 수치지형도형태의 토지이용도를 이용하여 정밀하게 추정할 수 있다. 이 논문에서는 조만강유역의 토지이용 현황도를 분석하여 주거지, 상업지, 공업지 등 불투수면적을 합산한 후 전체 면적에 대한 불투수면적비를 산정하였다.

⑤ 소유역 경사

소유역의 경사는 지형정보시스템의 hydrologic modeling 도구를 사용하여 소유역별로 산정한다. 먼저 수치지형도의 표고값으로 DEM(Digital Elevation Model)을 생성하고 생성된 DEM으로부터 경사도를 분석한다.

⑥ 지표면 요지(凹地) 저류량

지표면 요지 저류량은 투수 및 불투수면적에서 지표유출의 발생에 앞서 채워지는 체적이다. 이는 표면에서 저류, 습윤, 차단, 증발과 같은 현상들로 인한 손실로 간주된다.

RUNOFF 블록에서 투수면적의 지표면 저류량은 침투(그리고 증발)의 대상이며 불투수면적내의 지표면 저류량은 증발에 의해서만 소멸되는 것으로 가정한다. SWMM에서 평균 지표면저류 깊이(mm)는 아래의 식으로 표현된다(식 2.6).

$$d_p = 0.0303 \cdot S^{-0.49} \quad (2.6)$$

여기서 d_p =WSTORE=지표면 저류 깊이(inches)

S =WSLOPE=유역 경사(percent)

또한 지표면 저류량은 SWMM 모형보정 매개변수로 사용하며 유출 체적을 보정한다. 그림 2.3은 유역의 경사와 지표면 저류량의 관계를 도시한 것이다.

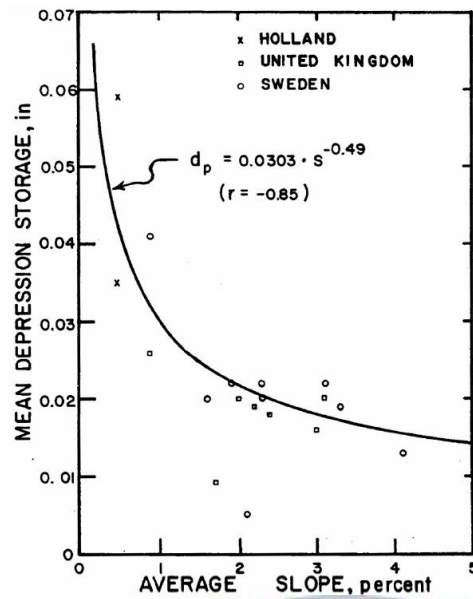


그림 2.3 유역 경사와 지표면
저류량의 관계(Kidd, 1978)

⑦ 지표유출의 기본 방정식

지표유출은 그림 2.4와 같은 비선형 저류지로 개념화된 3개의 유역(그림 2.5)에서 생성된다. 그리고 SWMM의 기본 방정식은 비선형 저류지 방정식인데 이는 연속방정식과 Manning방정식의 결합으로 도출된다.

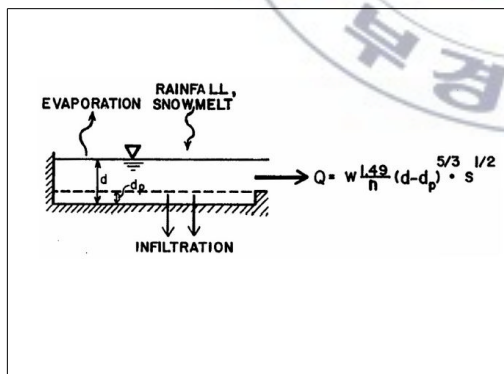


그림 2.4 소유역의 비선형
저류지 모형

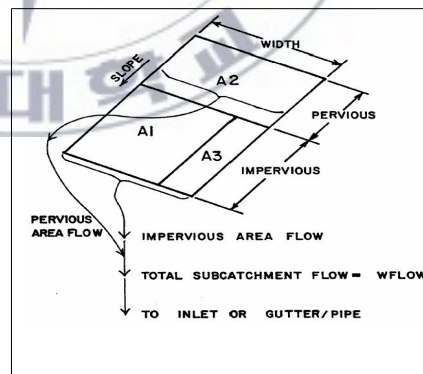


그림 2.5 소유역의 개념화된
면적분리

소유역에서 연속 방정식은 다음과 같다(식 2.7).

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A_s \cdot i^* - Q \quad (2.7)$$

여기서,

V= a · d=비선형 저류지내 물의 체적(m³)

d= 비선형 저류지내 수심(m)

t= 시간(sec)

A= 비선형 저류지의 면적(m²)

i^{*}= 초과 강우량(m/sec)

Q= 유출량(m³/sec)

또한 Manning 방정식을 쓰면 다음과 같다(식 2.8).

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2.8)$$

여기서,

W= 소유역의 폭(m)

n= Manning의 조도계수

d_p= 지표면 저류 깊이(m)

S= 소유역의 경사(m/m)

연속 방정식과 Manning방정식을 결합하여 미지수 d에 대해 정리하여 비선형 미분 방정식을 다음과 같이 얻는다(식 2.9).

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = i^* - \frac{1 \cdot W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2.9)$$

$$= i^* + WCON \cdot (d - d_p)^{5/3}$$

$$\text{여기서, } WCON = -\frac{1 \cdot W \cdot S^{1/2}}{A \cdot n}$$

얻어진 비선형 저류 방정식은 각 시간 간격에 대해 유한차분법을 적용하여 해를 구한다. 이를 위하여 식 2.9 우변의 유입량과 유출량은 시간에 대한 평균값을 사용하여야 한다. 평균 유출량은 평균 수심으로 식 2.10과 같이 계산한다. 여기서 d_1 은 t 시간에서의 수심, d_2 는 $t+\Delta t$ 에서의 수심이다. 초과강우량 i^* 는 각 연산 시간구간의 평균값으로 주어진다. 차분식의 형태는 다음과 같다(식 2.10).

$$\frac{(d_2 - d_1)}{\Delta t} = i^* + WCON \cdot \left[d_1 + \frac{(d_2 - d_1)}{2} - d_p \right]^{5/3} \quad (2.10)$$

차분식의 해를 얻기 위한 경계 조건은 다음과 같다. 초기시간 t_0 일 때, 지표면 저류량은 없다. 소유역 결합체의 최상류에서 유입은 없으며, 지표 유출은 연결된 하류유역으로만 유출된다.



2.2.2 EXTRAN 블록

EXTRAN 블록은 도시유역의 유출해석을 위해 Shubinski와 Roesner(1973)에 의해 개발되었으며 1981년 미국 EPA에서 기존 SWMM 모형의 TRANSPORT 블록을 보완하기 위해 이를 SWMM 모형에 삽입시켰다.

EXTRAN 블록은 기존 도시유출모형들이 계산할 수 없었던 loop형 관망형태의 흐름, 배수, 역류, 압력류(surcharge)계산과 웨어, 오리피스, 저류지, 펌프장 등에서 흐름의 추적계산이 가능하도록 설계된 수리모형이다.

EXTRAN 블록은 배수관망 체계에서 유량과 수심을 계산하기 위해 개수로/관수로 등으로 유입되는 RUNOFF 블록에서 계산된 유입수문곡선을 dynamic wave 방정식을 사용하여 추적한다. 이 모형은 합류, 분류 시스템으로 구성되는 도시배수유역에서 유출현상을 모의할 수 있으며, 자연수로와 같은 임의 단면의 수로는 사다리꼴로 근사하여 계산한다. 흐름을 정상류로 가정하고 유출해석을 하는 경우 배수곡선을 구할 수 없으므로, 이러한 문제점을 보완하기 위하여 EXTRAN 블록은 흐름을 부정류로 계산하도록 설계되었다.

기본방정식으로 1차원 부정류 점변류방정식(St. Venant 식)인 dynamic 방정식을 사용하며, 수치해석적으로 시간에 대해 전진법인 양해법(explicit method)을 사용한다. 연산 시간간격은 시스템내에서 가장 짧은 수로/관로를 통과하는 파속의 크기를 고려하여 결정되며, 배수시스템을 link와 node로 구성하여 loop형 배수관망, 웨어, 오리피스, 펌프 등의 수리구조물로 인한 측방류 유입, 부분적인 압력류 등을 계산할 수 있다.

EXTRAN 블록에서 흐름 추적의 기본방정식은 연속방정식(식 2.11)과 개수로 일차원 점변 부정류 방정식으로 다음과 같다(식 2.12).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2.12)$$

여기서 Q는 유출량(m³/sec),

Q= 유출량(m³/sec)

A= 비선형 저류지의 면적(m²)

t= 시간(sec)

x= r관 또는 하도의 시점으로 부터의 거리(m)

g= 중력가속도(9.8 m/sec²)

H= 수두(m)

S_f= 마찰경사

EXTRAN 블록은 link에서 운동량방정식을 node에서 연속방정식을 각각 사용한다. 해를 구하기 위해 식 2.13, 2.14로부터 식 2.12를 변형시킨다.

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial (V^2 A)}{\partial x} = 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (2.14)$$

식 2.13, 2.14를 식 2.12에 대입하고 정리하면 종속변수 Q, A, V, H 등을 갖는 운동량방정식 식 2.15를 얻는다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2.15)$$

식 2.11에 Q = AV 를 대입하고 정리하면,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (2.16)$$

이 식에 V를 곱하고 정리하면,

$$AV \frac{\partial V}{\partial x} = -V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (2.17)$$

식 2.17을 식 2.15에 대입하고 정리하면 EXTRAN 블록에서 하수의 흐름추적에 사용되는 다음의 기본방정식이 유도된다(식 2.18).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

EXTRAN 블록은 운동량방정식의 해를 구하기 위해 차분방정식을 사용하는데, 3가지의 각기 다른 연산기법을 이용하여 해를 구할 수 있다. 먼저, Manning식으로 마찰경사를 나타내면 식 2.19와 같다.

$$S_f = \frac{k}{gAR^{4/3}} Q |V| \quad (2.19)$$

여기서, k 는 $g \times n^2$ 이며, 속도의 절대값을 사용한 것은 S_f 를 흐름방향으로 설정하여 마찰력이 항상 흐름방향과 반대가 되도록 설정하기 위함이다. 식 2.19를 식 2.18에 대입하고 유한차분법의 형태로 나타내면 다음과 같다(식 2.20).

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V_t| Q_{t+\Delta t} + 2V \left[\frac{\Delta A}{\Delta t} \right]_t \Delta t + V^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - gA \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \quad (2.20)$$

$Q_{t+\Delta t}$ 에 대해 위의 식을 정리한 다음의 유한차분 방정식(식 2.21)이 link 내 흐름추적의 수식이다.

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V|} [Q_t + 2\bar{V} \left[\frac{\Delta A}{\Delta t} \right]_t \Delta t + \bar{V}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t] \quad (2.21)$$

식 2.21에서 V , R , A 는 시간 t 에서, link 양단의 가중평균 값이다.

식 2.21에서 미지 값은 $Q_{t+\Delta t}$ 와 H_2 , H_1 이며, 변수 V , R , A 는 Q 와 H 로 구성된다. 그러므로, 이 방정식의 해를 구하기 위해서는 Q 와 H 에 대한 하나의 방정식이 더 필요하며, node의 연속방정식이 사용된다. 즉,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_s} \quad (2.22)$$

위 식 2.22를 수심에 대해 차분하면

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q \Delta t}{A_s} \quad (2.23)$$

식 2.23에서 A_s 는 node의 수표면적이다.

식 2.21와 2.23은 각 연산시간구간 Δt 에서 node의 수심과 link내의 유량을 계산하기 위해 사용된다.

EXTRAN 블록의 경계조건은 아래와 같다.

1) 초기조건

EXTRAN 블록 뿐만 아니라 다른 블록(모형)의 적용에서 공통적인 초기조건은 건기의 배수량(하수량)과 이때의 수위이다.

2) 경계조건

앞에서 언급한 차분방정식의 해를 구하기 위해서는 2개의 경계조건이 필요하다. 대부분의 경우 상류부의 경계조건은 소유역의 지표면유출량이 되며, 하류부의 경계조건은 유량 또는 수심이 된다.

흐름조건에 따른 초기, 경계조건의 변화는 다음과 같다.

① 흐름이 상류인 경우

하류부에서 흐름의 영향이 상류(上流)로 전달되기 때문에 상하류의 초기조건과 경계조건이 주어진다. 여기에서, 하류부 경계조건은 관거내의 물리적인 조건을 고려하여 결정한다.

② 흐름이 사류인 경우

초기조건과 더불어 상류관거에서 2개의 경계조건이 주어지며 하류방향으로 계산이 수행된다. 이것은 흐름이 사류인 경우에는 하류부의 영향이 상류로 전달되지 않기 때문이다. 이때 상류의 경계조건은 유량과 수심, 수심과 유속 등이다.

2.2.3 STORAGE-TREATMENT 블록

STORAGE-TREATMENT 블록은 건기 또는 우기의 저수지/하수처리장을 통한 흐름과 오염물질을 추적한다. 그리고 단일사상 모의나 연속유출 모의에 모두 사용할 수 있다.

STORAGE-TREATMENT 블록의 흐름 추적에서 저수지 저류량 변동은 질량보존식에 의해 계산된다. 단위 시간당 저류량의 변동은 아래의 식으로 표현할 수 있다(식 2.24).

$$\Delta V / \Delta t = \bar{I} - \bar{O} \quad (2.24)$$

여기서, $\bar{I}$ 는 Δt 시간동안 평균 유입률(m^3/sec), $\bar{O}$ 는 평균 유출률(m^3/sec). V 는 저수지 부피(m^3)이다. 아래첨자 1과 2를 부여하여 각각 시간단계의 시작과 끝을 나타내면, 평균 유입률($\bar{I}$)과 평균 유출률($\bar{O}$)는 다음과 같다(식 2.25, 2.26).

$$\bar{I} = (I_1 + I_2) / 2 \quad (2.25)$$

$$\bar{O} = (O_1 + O_2) / 2 \quad (2.26)$$

또한 저수지 저류량변동은 다음과 같다(식 2.27).

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (2.27)$$

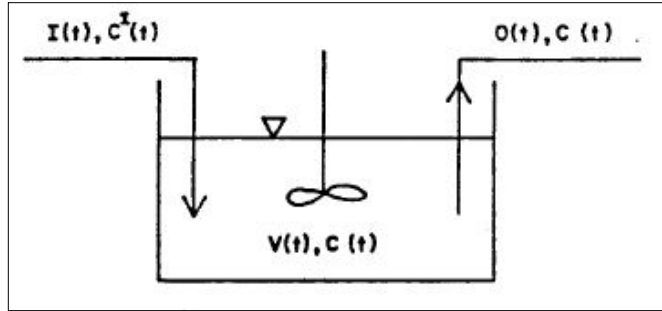
식을 다시 쓰면 아래와 같고 계산 시간 간격별 저류량을 추적하게 된다(식 2.28).

$$V_2 - V_1 = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t \quad (2.28)$$

한편 오염물의 추적은 완전 혼합 흐름 반응조 모형으로 수행된다. 완전

혼합 흐름 반응조 모형의 경우, 반응조에 남은 있는 오염물질의 농도는 방류수의 오염물질농도와 동일한 것으로 가정한다.

완전 혼합 흐름 반응조 모형은 아래의 그림으로 표현할 수 있으며 질량 보존식을 표현하면 식 2.29와 같다(Medina, 1976).



$$\frac{d(VC)}{dt} = I(t)C^I(t) - O(t)C(t) - KC(t)V(t) \quad (2.29)$$

여기서 V 는 저수지 체적(m^3), C^I 는 유입수의 오염물 농도(mg/L), C 는 유출수의 오염물 농도, I 는 유입수의 유량(m^3/sec), O 는 유출수의 유량(m^3/sec), t 는 시간, K 는 오염물의 감쇠계수(sec^{-1})이다.

임의 시간간격 Δt 에 대한 식으로 고치면 식 2.30과 같다.

$$C_2V_2 - C_1V_1 = \frac{C_1^I I_1 + C_2^I I_2}{2} \Delta t - \frac{C_1 O_1 + C_2 O_2}{2} \Delta t - K \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{2} \Delta t \quad (2.30)$$

C_2 에 대하여 정리하면 아래 식 2.31과 같다.

$$C_2 = \frac{C_1 V_1 + \frac{C_1^I I_1 + C_2^I I_2}{2} \Delta t - \frac{C_1 O_1}{2} \Delta t - K \frac{C_1 V_1}{2} \Delta t}{V_2 (1 + \frac{K \Delta t}{2}) + \frac{O_2}{2} \Delta t} \quad (2.31)$$

위의 식은 저수지 완전한 혼합 흐름 반응조 모형의 기본 방정식이다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역의 현황 및 특성

3.1.1 조만강유역의 일반 현황

이 논문에서 SWMM의 적용 대상 하천인 조만강은 낙동강 하구로부터 약 2 km 상류지점에서 낙동강의 파천인 서낙동강으로 유입하는 지방 2급 하천이다. 유역면적은 약 137.8 km²이며 유로연장은 약 21.0 km인 중소하천이다. 또한 유역의 최장 남북길이는 약 15.1 km, 동서길이는 약 14.1 km이다.

유역의 북쪽과 서쪽 분수계는 황새봉(El. 392.6 m)과 경운산(El. 378.7 m)의 능선을 따라 북쪽은 한림면과 동쪽은 삼계동 및 내동과 경계를 이루고 있으며, 유역의 남서쪽은 불모산(El. 801.7 m)을 비롯한 화산, 굴암산 등 높은 산들의 능선으로 이루어져 있다.

조만강수계는 주촌면 덕암리 황새봉 정곡에서 남동쪽으로 흘러 좌안에 서 원지천(지방2급)이 합류하고 우안으로 유하천(지방2급), 대청천(지방2급), 율하천(지방2급)이 합류하여 동남쪽으로 방향을 바꾸어 해반천이 합류한 후 서낙동강으로 유입하는 형태이다(경상남도, 2005). 그림 3.1과 표 3.1은 조만강의 수계를 나타낸다.

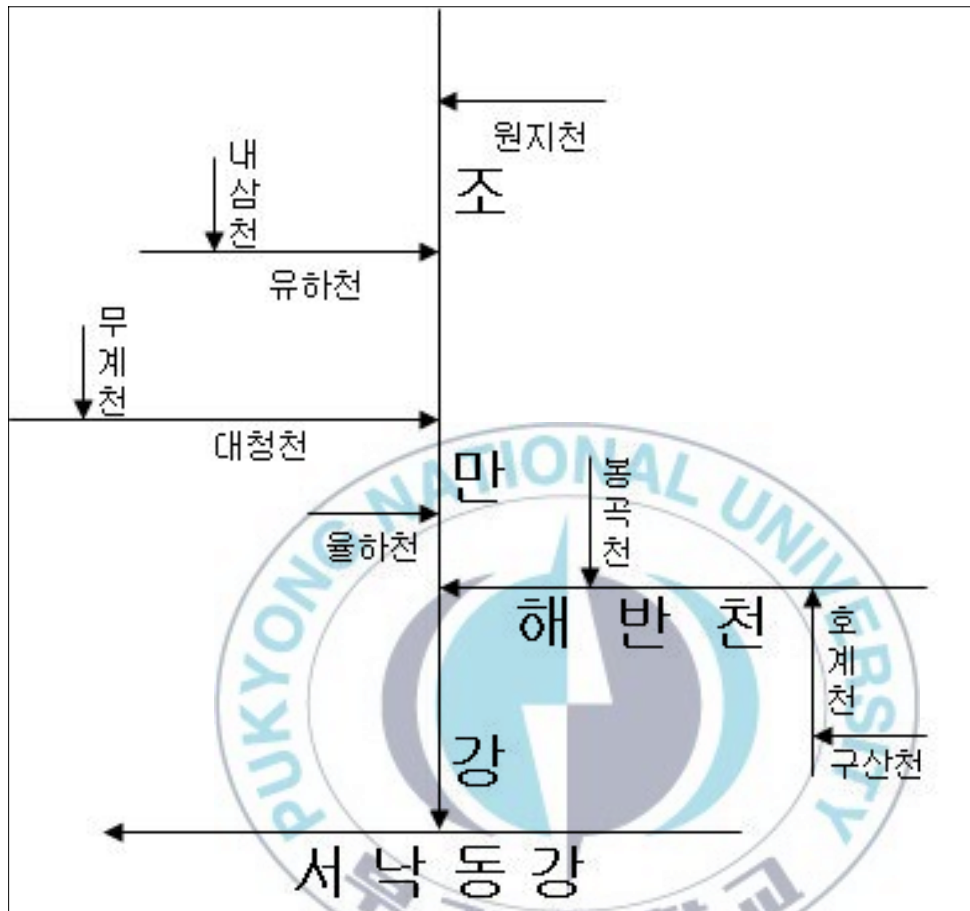


그림 3.1 조만강수계 모식도

표 3.1 조만강수계 구성(건설교통부, 2001)

하천명	본류	제1 지류	제2 지류	제3 지류	제4 지류	연장 (km)	시점				종점			
							시도	군구	동면	경계	시도	군구	동면	경계
조만강	서낙동강	조만강				19.80	김해		주촌		부산	강서	범방	서낙동강 합류점 (조만교)
원지천	서낙동강	조만강	원지천			2.20	김해		주촌	원지	김해		주촌	조만강 합류점
유하천	서낙동강	조만강	유하천			3.20	김해		주촌	유하	김해		장유	조만강 합류점
내삼천	서낙동강	조만강	유하천	내삼천		3.80	김해		주촌	내삼	김해		주촌	유하천 합류점
대청천	서낙동강	조만강	대청천			7.20	김해		장유	대청	김해		장유	조만강 합류점
무계천	서낙동강	조만강	대청천	무계천		1.50	김해		장유	무계	김해		장유	대청천 합류점
율하천	서낙동강	조만강	율하천			5.50	김해		장유	율하	김해		장유	조만강 합류점
해반천	서낙동강	조만강	해반천			11.50	김해		삼계		김해		장유	조만강 합류점
구산천	서낙동강	조만강	해반천	구산천		0.90	부산	강서	죽림	415번 지선	김해		풍류	122번 지선
호계천	서낙동강	조만강	해반천	구산천	호계천	0.30	부산	강서	죽림	419-2 4 (검천 교)	김해		풍류	415번 지선
봉곡천	서낙동강	조만강	해반천	봉곡천		2.80	김해		내동	봉곡	김해		화목	해반천 합류점

3.1.2 합류식 하수관거 현황

조만강 유역 내의 장유지역에서 발생하는 생활하수는 대청천을 따라 매설된 합류식 하수관거를 따라 장유 하수처리장으로 유입된다. 또한 동 지역에서 발생하는 하수는 해반천을 따라 매설된 합류식 하수관거로 흘러 화목하수처리장으로 유입한다. 그림 3.2는 조만강유역내의 합류식 하수관거의 간선망도이며 삼각형으로 표시한 것은 하수처리장이다.

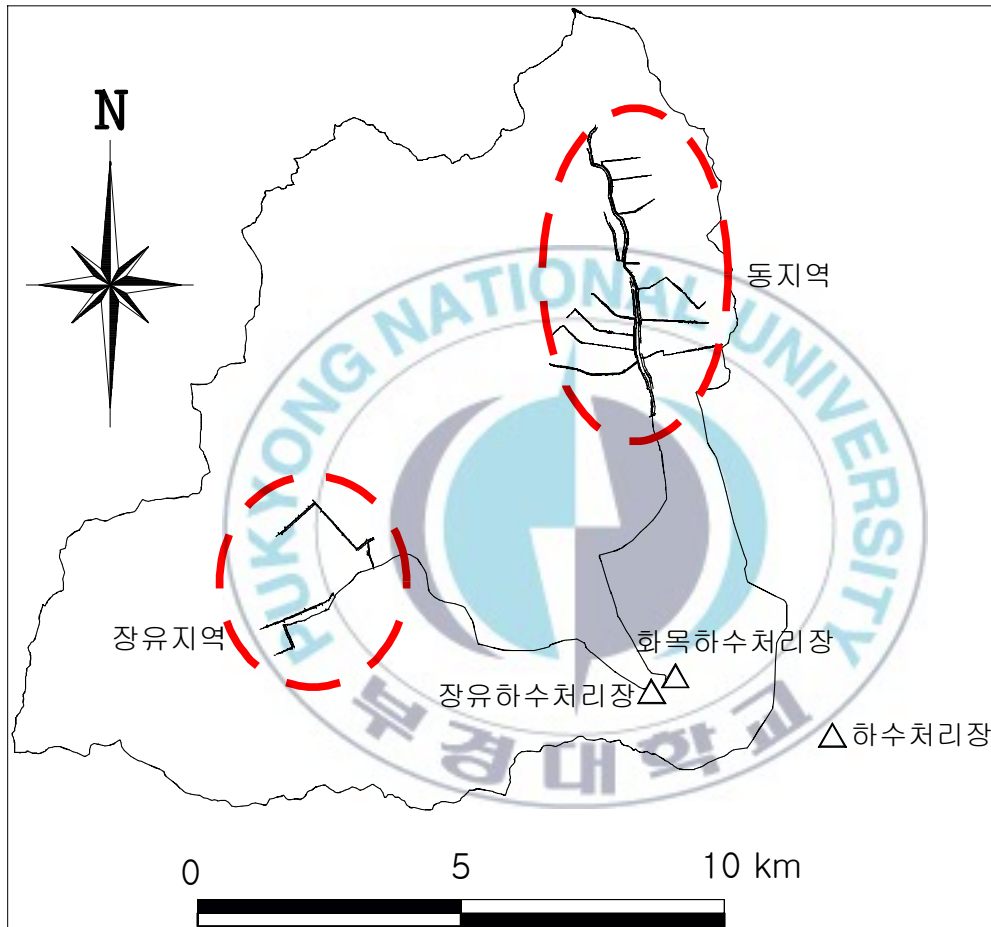


그림 3.2 조만강유역의 합류식 하수관거 간선망도

3.1.3 화목·장유 하수처리장 현황

조만강유역의 하수처리장은 현재 화목, 장유공공하수처리장이 가동 중이다. 1995년도에 114,000 m³/day 처리규모의 화목공공하수처리시설을 착공하여 1999년에 완공하였으며, 김해시 동지역 발생오수를 처리하고 있다.

또한 각종 개발계획의 추진 등으로 늘어난 하수를 처리하기 위하여 31,000 m³/day의 증설과 더불어 방류수질 향상을 위한 고도처리방식으로 개선하는 공사를 추진 중이다. 조만강유역의 가동중인 공공하수처리시설 현황은 다음 표 3.2와 같다.

표 3.2 조만강유역의 공공하수처리시설 현황

구 분	화 목	장 유
위 치	김해시 화목동	김해시 화목동
부지면적(m ²)	107,400	140,000
처리용량(m ³ /day)	114,000	97,000
차집관거연장(km)	15.5	9.46
가동년도	1999. 5	2004. 12
처리분구	회현, 활천, 칠산	주촌, 공단, 대청, 율하
방류하천	조만강	조만강

3.2 모형 입력자료 구성

3.2.1 유역 분할

조만강유역의 특성인자를 추출하기 위해 유역분할을 실시하였다. 전체 유역의 경계를 정하고 수치 지형도(1:25,000)와 김해시 UIS(Urban Information System) 하수관망도, 화목·장유하수처리장의 처리구역 및 배수구역도등을 고려하여 배수구역 경계를 설정하였다. 그리고 각 소유역

의 토지이용상태와 토양특성 등의 자료를 반영하여 최종적으로 소유역을 37개로 분할하였다(그림 3.3).

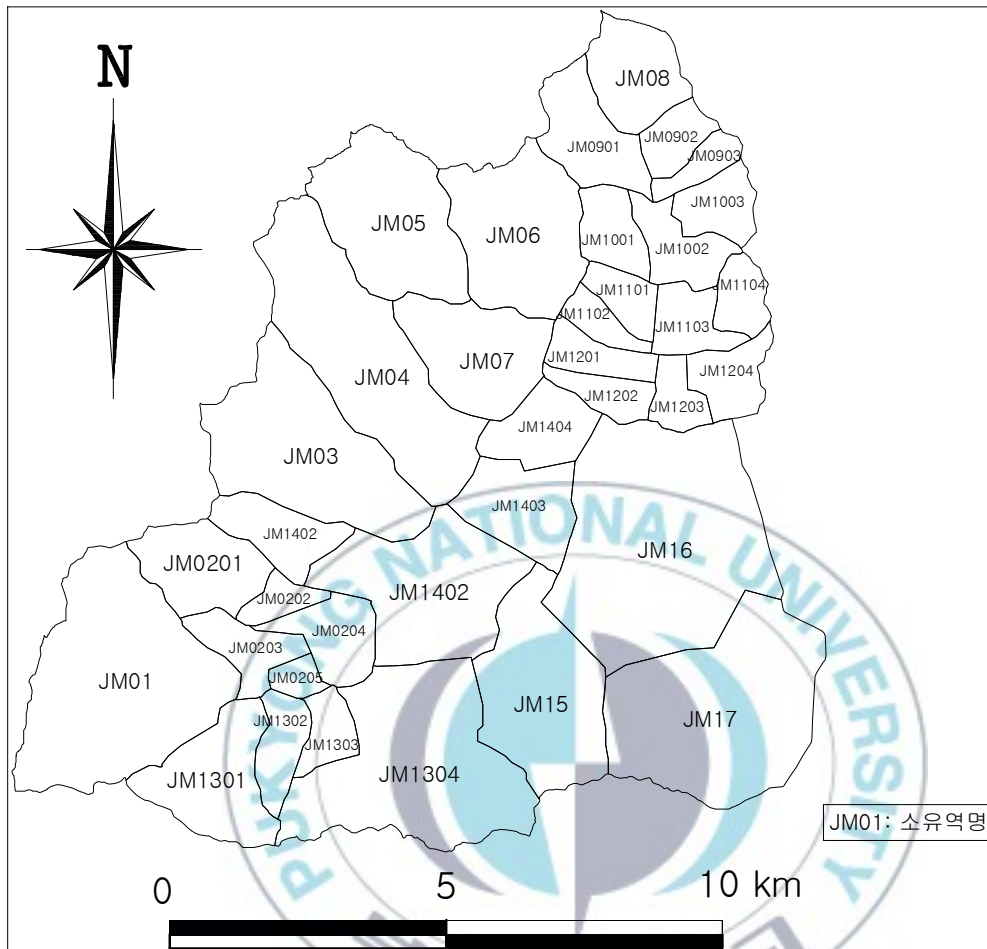


그림 3.3 조만강유역의 하수간선망을 고려한 소유역 분할

유역분할은 물리적인 배수시스템을 모의 하는 과정의 첫 번째 절차이다. SWMM모형에서 각 소유역은 균등한 유역특성(경사, 조도 등)을 갖는 직사각형이며 유역의 형태는 면적, 유역폭, 경사 등의 요소로 정의된다. 지표면의 양상은 저류깊이, 조도계수, SCS CN 등으로 구성하였다. 불규칙한 형상을 가진 소유역은 평균폭의 정의를 사용하여 직사각형으로 근사하였다.

그림 3.3의 유역분할에서 각 유역별 이름의 첫 알파벳 두 자는 해당 하천의 영문 약어(略語)이며 뒤의 숫자는 각 소유역 마다 고유하게 부여된 숫자이다.

3.2.2 유역 입력자료

소유역과 관련된 입력자료는 크게 물리적 매개변수(physical parameter)와 수문학적 매개변수(hydrological parameter)로 분류할 수 있다. 물리적 매개변수는 소유역(subcatchment) 관련 매개변수와 하도/관망(channel/pipe) 관련 매개변수로 나눌 수 있다. 소유역 관련 매개변수는 소유역의 면적, 폭, 평균경사, 불투수지역의 면적이며 하도/관망 관련 매개변수는 하도/관망의 길이, 폭 및 지름, 평균경사이다.

수문학적 매개변수는 Manning 조도(roughness), 요지저류(depression storage), 침투(infiltration) 관련 매개변수로 분류할 수 있다. 조도 계수는 투수 및 불투수 지역의 Manning 조도 계수, 하도/관망의 Manning 조도 계수이며 요지저류관련 매개변수는 투수 및 불투수 면적의 지표면 저류량이다.

위에서 언급한 물리적 매개변수들을 모형 입력값으로 구축하기 위해 조만강유역의 수치지형도(1:25,000), 토지이용도, 정밀토양도, 하도 종/횡 단면도, 김해시 도시정보시스템(UIS) 하수 간선관망도 등을 수집하여 지형정보시스템 분석 프로그램인 Arcview 3.3을 이용하여 분석하였다. 표 3.3은 소유역별 입력자료를 요약한 것이다.

표 3.3 소유역별 입력자료

소유역명	유역경사(%)	유역폭(m)	유역면적(ha)	불투수율(%)
JM01	24.03	8015	1132.8	3.5
JM0201	23.74	3705	310.7	0.5
JM0202	16.13	1903	82.4	15.3
JM0203	20.92	2737	167.8	9.2
JM0204	17.32	2871	203.9	20.6
JM0205	11.79	1478	56.8	23.1
JM03	13.77	6735	809.1	12.2
JM04	14.37	10686	934.1	14.2
JM05	17.31	5676	616.3	8.3
JM06	19.25	6275	601.3	9.5
JM07	10.33	5062	436.5	15.4
JM08	19.76	3145	280.5	16.0
JM0901	18.95	2538	281.5	18.9
JM0902	17.10	1214	121.4	5.2
JM0903	17.51	1358	87.7	5.7
JM1001	19.52	1655	157.4	11.3
JM1002	13.56	2234	184.0	27.8
JM1003	18.90	1060	154.9	1.2
JM1101	10.25	1565	113.3	48.2
JM1102	11.47	3155	86.6	50.7
JM1103	6.02	2146	150.9	65.4
JM1104	20.83	2085	117.2	2.7
JM1201	6.56	3207	128.0	65.6
JM1202	10.27	2848	114.0	57.4
JM1203	4.67	2895	105.5	65.4
JM1204	6.87	2288	161.7	77.0
JM1301	24.17	2486	406.4	3.0
JM1302	19.89	1383	150.0	9.4
JM1303	15.84	2249	114.7	14.9
JM1304	13.60	3882	1003.1	5.9
JM1401	17.48	1939	215.7	13.7
JM1402	5.81	7430	683.3	20.9
JM1403	4.00	2632	306.5	13.4
JM1404	7.19	1318	224.1	20.8
JM15	7.81	4770	657.8	8.1
JM16	0.71	10942	1374.8	7.7
JM17	3.68	7164	1052.5	5.9

3.2.3 유역의 급수량 산정

그림 3.4는 배수체계의 유출 및 수질모의에서 고려해야 할 사항의 간략한 개념도이다. 위의 사항 중 강수량, 증발산량은 기상청의 자료를 획득하여 알 수 있는 자료이다. 그러나 배수체계로 들어가는 급수량과 손실로 고려되는 농업용수의 사용량은 그 양을 추정하기가 어렵다.

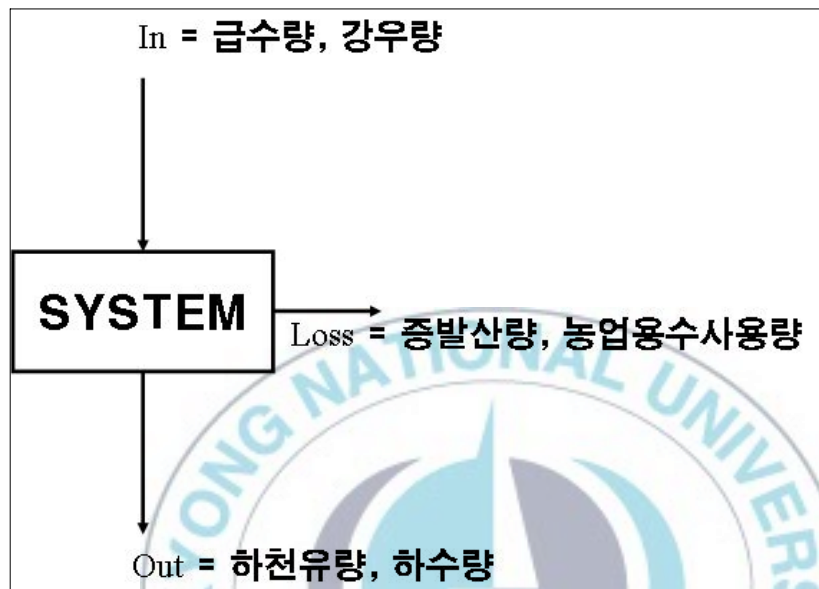


그림 3.4 배수체계의 개념도

이 논문에서는 하수간선망을 고려하여 분할된 소유역별 급수인구를 추정하여 급수량을 산정하고자 한다. 이를 위해 전국수도종합계획(환경부, 2006)에서 제시한 읍, 면, 동 단위 급수인구 추정량을 사용하여 소유역별 급수인구를 산정하였다.

수치지형도에서 확인한 결과 조만강유역의 읍, 면, 동 경계는 도심과 전원지역의 경계와 유사한 지역이 많았다. 따라서 소유역의 급수인구 추정에 읍, 면, 동면적에 대한 소유역의 면적비를 이용하였으며 그 방법은 다음과 같다.

그림 3.5에서 조건이 표 3.4과 같다면 해당 소유역의 급수인구는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{소유역의 급수인구} &= (A\text{지역의 급수인구} \times \frac{\text{면적}A^*}{\text{면적}A}) + (B\text{지역의 급수인구} \times \frac{\text{면적}B^*}{\text{면적}B}) \\
 &= (50 \times \frac{2}{10}) + (100 \times \frac{3}{15}) \\
 &= 30 \text{명}
 \end{aligned}$$

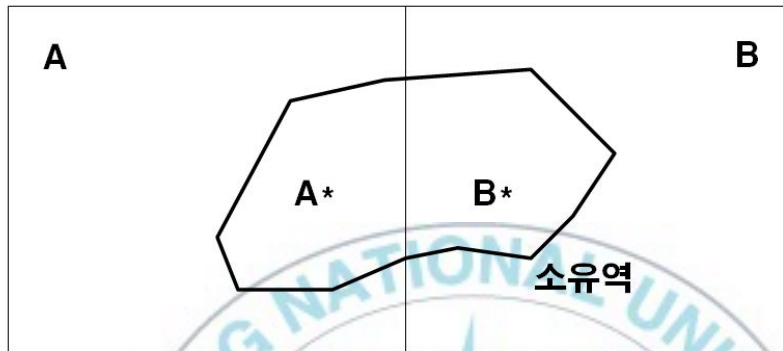


그림 3.5 소유별 급수량 산정

표 3.4 행정구역별 급수인구

행정구역	A	B	A*	B*
면적(km ²)	10	15	2	3
급수인구(명)	50	100		

위의 방법으로 산정한 소유역별 급수인구에 단위급수량을 곱하여 급수량을 산정하였으며 산정된 급수량의 65 %가 회귀되는 것으로 가정한다. 그리고 농업용수 사용량의 경우 유역조사결과 고려해야 할 소유역이 없었다. 표 3.5에 산정된 급수인구와 급수량을 요약하였다.

표 3.5 조만강유역의 소유역별 급수량 산정

소유역명	급수인구 (명)	단위 급수량 (L/day)	일평균 급수량 (m ³ /day)	평균급수량 (m ³ /sec)	회귀량 (m ³ /sec)
JM01	18,157	288	5,229	0.0605	0.0393
JM0201	5,024	288	1,447	0.0167	0.0109
JM0202	1,337	288	385	0.0045	0.0029
JM0203	2,723	288	784	0.0091	0.0059
JM0204	3,309	288	953	0.0110	0.0072
JM0205	922	288	265	0.0031	0.0020
JM03	13,023	288	3,751	0.0434	0.0282
JM04	127	288	37	0.0004	0.0003
JM05	83	288	24	0.0003	0.0002
JM06	81	288	23	0.0003	0.0002
JM07	59	288	17	0.0002	0.0001
JM08	12,817	288	3,691	0.0427	0.0278
JM0901	12,763	288	3,676	0.0425	0.0277
JM0902	5,625	288	1,620	0.0187	0.0122
JM0903	4,052	288	1,167	0.0135	0.0088
JM1001	6,908	288	1,990	0.0230	0.0150
JM1002	8,502	288	2,448	0.0283	0.0184
JM1003	7,167	288	2,064	0.0239	0.0155
JM1101	5,167	288	1,488	0.0172	0.0112
JM1102	3,985	288	1,148	0.0133	0.0086
JM1103	6,902	288	1,988	0.0230	0.0150
JM1104	4,741	288	1,366	0.0158	0.0103
JM1201	5,865	288	1,689	0.0195	0.0127
JM1202	4,994	288	1,438	0.0166	0.0108
JM1203	4,862	288	1,400	0.0162	0.0105
JM1204	7,451	288	2,146	0.0248	0.0161
JM1301	6,466	288	1,862	0.0216	0.0140
JM1302	2,434	288	701	0.0081	0.0053
JM1303	1,862	288	536	0.0062	0.0040
JM1304	16,209	288	4,668	0.0540	0.0351
JM1401	3,495	288	1,007	0.0116	0.0076
JM1402	11,091	288	3,194	0.0370	0.0240
JM1403	42	288	12	0.0001	0.0001
JM1404	10,392	288	2,993	0.0346	0.0225
JM15	10,677	288	3,075	0.0356	0.0231
JM16	62,934	288	18,125	0.2098	0.1364
JM17	17,063	288	4,914	0.0569	0.0370

3.2.4 유역의 지형 및 토지이용 분석

조만강 유역의 유출 및 수질모의를 위하여 수문 순환과정의 해석을 위한 기본자료의 확보가 필요하다. 따라서 조만강 유역의 모의에 필요한 기본자료인 소유역 폭, 소유역 면적, 하도길이, 경사(소유역, 하도) 등의 지형 요소들을 추출해야 한다.

조만강 유역은 도시지역과 전원지역이 복합되어 있다. 따라서 강우와 유출의 관계가 토지이용현황, 하수관망 시스템 등과 복잡하게 연관되므로 정밀한 지형요소의 추출이 필요하다. 최근에는 정밀한 지형자료의 요구수준에 부합하는 결과를 얻기 위해 지형요소의 추출에 지형정보시스템을 사용하는데 지형정보시스템을 사용한 지형요소 추출의 장점은 작업자의 주관에 배제한 객관적인 자료의 추출이 가능한 점이다. 이러한 장점은 모의 과정의 초기 입력단계에서 발생할 수 있는 오류를 줄일 수 있다. 이와 같은 장점 때문에 이 논문에서도 지형정보시스템을 이용한 유역분석을 실시하였다.

그림 3.6은 조만강 유역의 DEM(Digital Elevation Model) 분석 자료로서 유역의 서부와 북부에 험준한 산악지형이 있음을 알 수 있고, 유역의 중앙과 동부는 평탄한 저지대임을 알 수 있다.

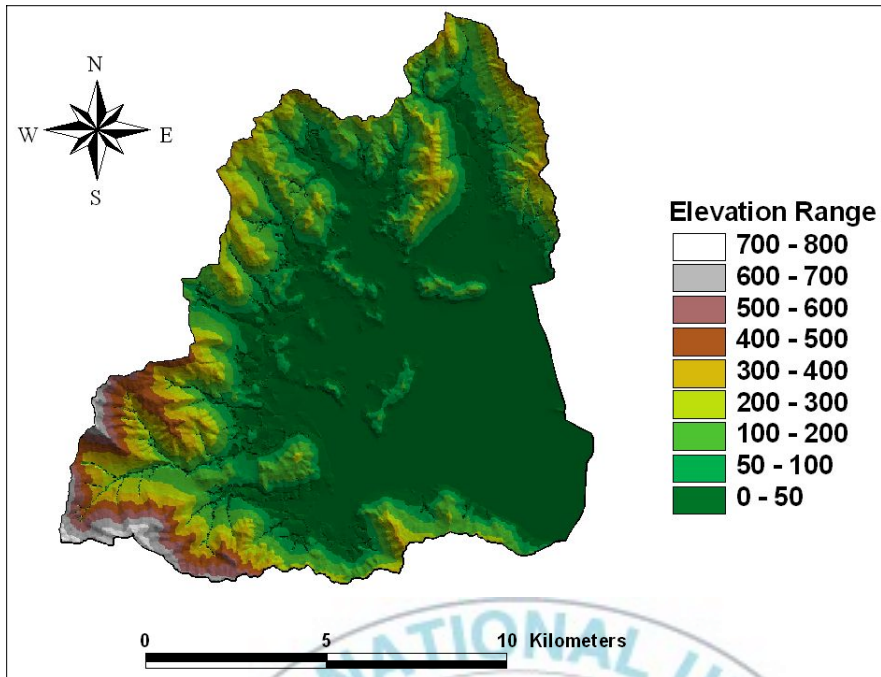


그림 3.6 조만강유역의 DEM 분석

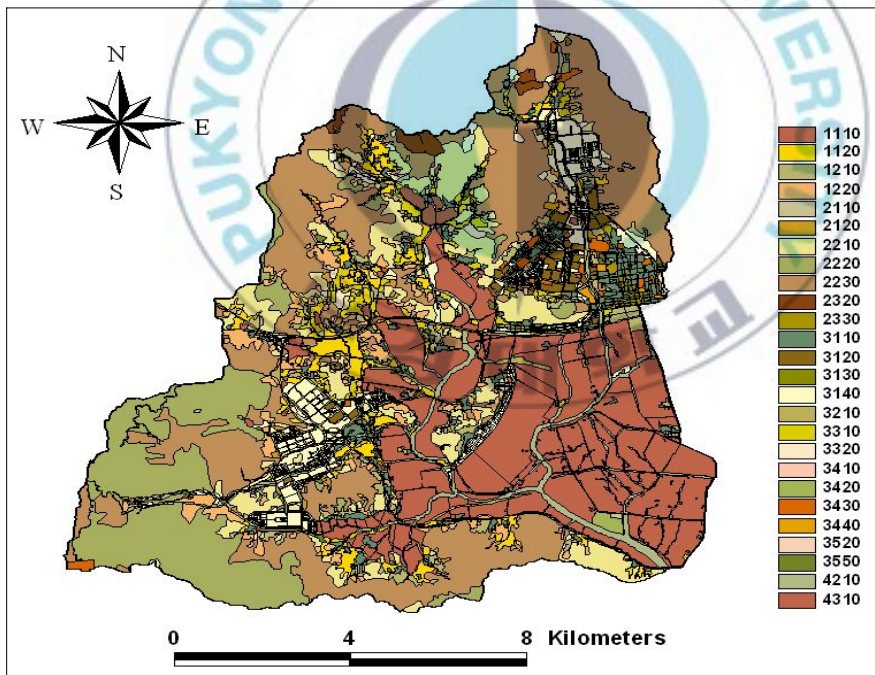


그림 3.7 조만강유역의 토지이용분석

그림 3.7은 조만강유역의 토지이용 현황도이며 토지이용 현황을 분석한 결과는 표 3.6과 같다. 네 자리 숫자로 이루어진 지형정보시스템의 토지 이용코드는 표 3.7과 같다.

표 3.6 조만강유역의 토지이용형태별 면적

기준연도	논/밭 (km ²)	임야 (km ²)	택지 (km ²)	기타 (km ²)	계 (km ²)
2001년	44.28	62.05	7.61	23.84	137.78

표 3.7 토지이용코드

코드	소분류	코드	소분류
1110	경지정리답	3230	공항
1120	미경지정리답	3240	항만
1210	보통, 특수작물	3310	공업시설
1220	과수원 기타	3320	공업나지, 기타
2110	자연초지	3410	발전시설
2120	인공초지	3420	처리장
2210	침엽수림	3430	교육, 군사시설
2220	활엽수림	3440	공공용지
2230	혼합수림	3510	양어장, 양식장
2310	골프장	3520	채광지역
2330	유원지	3530	매립지
2320	공원묘지	3540	광천지
2340	암벽 및 석산	3550	가축사육시설
3110	일반주택지	4110	갯벌
3120	고층주택지	4120	염전
3130	상업, 업무지	4210	하천
3140	나대지 및 인공녹지	4310	호, 소
3210	도로	4320	댐
3220	철로 및 주변지역	4410	백사장

3.3 수질 모의 입력자료

도시 유출의 수질 모의는 강우 사상 동안 지표면 오염물질의 “축적(buildup)”과 “유실(washoff)”의 개념으로 설명할 수 있다.

불투수 도시 면적에서 오염물질은 강우사상 전에 건기 동안 지표면에 축적된다. 이러한 축적은 시간이나 요소(분진, 흙먼지)의 함수이다.

그리고 축적된 오염물질은 강우와 함께 배수 시설로 씻겨 들어가며 이를 유실로 정의한다. 유실현상의 물리적 성질은 침식 계산에서 강우 에너지와 관계가 있거나 유사 이동 이론에서 흐름 저면 전단 응력의 함수와 관계가 있다.

3.3.1 축적(buildup)

SWMM 모형은 소유역의 지표면 오염물 축적량을 선형 또는 비선형 누적비로 계산한다. 오염물 축적량 산정의 형태는 ① 일 오염물 축적법, ② Power-Linear 법, ③ Exponential 법, ④ Michaelis-Menton 법 이 있다(표 3.8).

표 3.8 오염물 축적량 산정의 형태

구분	일 오염물 축적법	Power-Linear	Exponential	Michaelis-Menton
특성	선형	비선형		
매개변수	- 소유역별 오염물 축적량 - 소유역별 토지이용 면적비 - 소유역 면적 - 건기일수	- 오염물 한계치 - 축적 지수 - 축적 계수 - 건기일수		

① 일 오염물 축적법

토지이용 및 수질항목별 오염물질계산을 위하여 일 오염물 축적법을 사용한다. 즉, 토지이용 및 수질항목별로 오염물질 축적량을 입력하여 일 오염물질 발생량 $DD_{i,j}$ 를 계산하며, 소유역별 토지이용 면적비 및 건기일수를 고려하여 강우시점에서 최종 오염물질 축적량을 계산한다(식 3.1).

$$DD = \sum (DD_{i,j} \times A_p \times A_s \times t) \quad (3.1)$$

② Power-Linear 법

Power-Linear법은 지수함수식으로 비선형관계를 나타내지만 매개변수의 조정에 따라 선형에 가까워 진다. 축적지수와 축적계수를 통하여 축적량이 산정되며, 축적 한계량에서 축적량이 제한된다(식 3.2).

$$DD = DDFACT \times t^{DDPOW} \quad (3.2)$$

$$DD \leq DDLIM$$

여기서,

DD=	수질항목별 강우 초기의 오염물질 축적량(kg)
A_p =	소유역 면적 중 해당 토지이용 면적비
A_s =	소유역의 총 유역면적(ha)
t=	건기일수(days)
DDLIM=	오염물의 축적 한계량(kg)
DDPOW=	축적지수(power)
DDFACT=	축적계수(kg/ha/day)

③ Exponential 법

Exponential 법은 지수함수식으로 비선형관계를 나타낸다. 축적지수와 한계축적량을 통해 축적량이 산정된다(식 3.3).

$$DD = DDLIM \times (1 - e^{-DDPOW \cdot t}) \quad (3.3)$$

④ Michaelis-Menton 법

Michaelis-Menton 법은 지수함수식으로 비선형관계를 나타낸다. 축적계수와 한계축적량을 통해 축적량이 산정된다(식 3.4).

$$DD = \frac{DDLIM \times t}{DDFACT + t} \quad (3.4)$$

3.3.2 유실(washoff)

① Linear-Exponential

오염물의 유실은 강우 시 오염물이 소유역으로부터 침식이나 용해되는 과정을 말한다. Sartor & Boyd(1972)는 스프링 쿨러를 이용하여 거리에서 오염물질이 유실되는 형태가 지수관계가 있다는 것을 밝혔으며 다음과 같다(식 3.5).

$$POFF(t) = PSHEd_0(1 - e^{-k \cdot t}) \quad (3.5)$$

여기서,

POFF(t)= 시간 t에 유실되는 누적 오염물의 양
PSHEd₀= 시간 t=0일 때 축적된 오염물의 양
k= 계수

또한 유실 후 잔류 오염물질량 PSHEd(t)는 PSHEd₀-POFF이므로 다음 식이 성립한다.

$$PSHEd(t) = PSHEd_0 e^{-k \cdot t} \quad (3.6)$$

여기서,

PSHEd(t)= 시간 t에 지표면에 남아있는 오염물의 양

위의 식을 미분하여 시간에 따른 유실률(mg/sec)로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dPSHEd}{dt} = -k \cdot PSHEd \quad (3.7)$$

계수 k는 유출률 r에 비례한다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = RCOEF \cdot r \quad (3.8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \text{RCOEF} &= \text{유실계수}(\text{mm}^{-1}) \\ r &= \text{유출률}(\text{mm/hr}) \end{aligned}$$

그리고 식 3.7을 유량 Q로 나누면 오염물질의 농도가 되며 다음과 같다.

$$C = \frac{d\text{PSHED}}{Q \cdot dt} = \frac{\text{RCOEF} \cdot r \cdot \text{PSHED}}{A \cdot r} \quad (3.9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C &= \text{농도}(\text{mg/L}) \\ Q &= A \cdot r = \text{유량}(\text{cms}) \\ A &= \text{유역면적}(\text{ha}) \\ r &= \text{유출률}(\text{mm/hr}) \end{aligned}$$

식 3.9에서 r은 소거되고, 남은 오염물질의 양(PSHED)은 시간에 따라 감소하므로 농도는 항상 시간이 지남에 따라 감소한다. 따라서 유출률(r)에 지수(WASHPO)를 적용하여 각각의 시간 간격마다 유실량을 계산할 수 있다.

$$- \text{POFF}(t) = \frac{d\text{PSHED}}{dt} = - \text{RCOEFX} \cdot r^{\text{WASHPO}} \cdot \text{PSHED} \quad (3.10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \text{POFF} &= \text{시간 } t \text{ 일 때 유실률}(\text{quantity/sec} \rightarrow \text{mg/sec}) \\ \text{PSHED} &= \text{시간 } t \text{ 일 때 잔류 오염물질량}(\text{mg}) \\ \text{RCOEFX} &= \text{유실계수} = \text{RCOEFX}/3600, (\text{mg/hr})^{-\text{WASHPO}} \cdot \text{sec}^{-1} \\ r &= \text{유출률}(\text{mm/hr}) \end{aligned}$$

또한 마지막 시점에서 남아있는 오염물질의 양과 농도는 식 3.11과 식 3.12와 같다.

$$\text{PSHED}(t + \Delta t) = \text{PSHED}(t) \cdot e^{-\text{RCOEF} \cdot \frac{r(t)^{\text{WASHPO}} + r(t + \Delta t)^{\text{WASHPO}}}{2}} \cdot \Delta t \quad (3.11)$$

$$C(t + \Delta t) = \frac{\text{Const. RCOEFX}}{A} \cdot r(t + \Delta t)^{\text{WASHPO} - 1} \cdot \text{PSHED}(t + \Delta t) \quad (3.12)$$

② Rating curve method

일반적으로 침전물질의 부하율은 유량이 증가할수록 증가하는 rating curve의 형태를 나타내며 다음과 같이 표현된다(식 3.13).

$$POFF = RCOEF \cdot WFLOW^{WASHPO} \quad (3.13)$$

여기서,

$WFLOW =$ 유역 유출량 (m^3/sec)
 $POFF =$ 시간 t 일때, 유실률 (mg/sec)
 $RCOEF =$ 유실계수 (mm^{-1})
 $WASHPO =$ 지수

위와 같이 설명한 축적과 유실 함수를 모형에 입력하였으며 사용된 매개변수를 표 3.9에 요약하였다. 매개변수는 수동 추정하였다.

표 3.9 매개변수 추정값(수동 추정)

축적 매개변수(buildup)				
토지이용상태	항목	함수	DDLIM	DDFACT
Residential	BOD	Michaelis-Menton	4.5	0.5
	COD		2.5	0.5
	TN		15	0.5
	TP		0.8	0.5
	TSS		14	0.5
Undeveloped	BOD		2.5	0.5
	COD		1.5	0.5
	TN		10	0.5
	TP		0.5	0.5
	TSS		10	0.5
유실 매개변수(washoff)				
토지이용상태	항목	함수	RCOEF	WASHPO
Residential	BOD	Linear-Exponential	0.02	0.15
	COD		0.08	0.15
	TN		0.01	0.15
	TP		0.006	0.15
	TSS		4.0	0.15
Undeveloped	BOD		0.01	0.15
	COD		0.04	0.15
	TN		0.005	0.15
	TP		0.003	0.15
	TSS		2.0	0.15

3.3.3 하수처리 함수

SWMM 5는 오염물질의 처리를 두 가지 형태로 입력할 수 있다. 첫째, 제거율의 함수로 입력가능하며, 둘째, 유출수의 오염물 농도 함수로 입력할 수 있다(식 3.14, 3.15).

$$R = f(P, R_P, V) \quad (3.14)$$

$$C = f(P, R_P, V) \quad (3.15)$$

여기서 R은 오염물질 제거율이며, R_P는 다른 오염물질의 제거율이다. C는 오염물질의 농도이다. 또한 P는 오염물질의 명칭이며, V는 변수(FLOW, DEPTH, HRT, DT, AREA)이다. 아래의 표 3.10은 처리식의 예이다.

표 3.10 하수처리함수의 예

BOD의 일차원 감쇠	총 부유 고형물 제거율의 20 %의 제거율을 가진 오염물질의 제거율
$C = BOD * \exp(-0.05 * HRT)$ ※ HRT: 수문학적 체류시간	$R = 0.2 * R_TSS$

3.4 자료수집

3.4.1 기상자료

모형의 기상 입력자료 구축을 위해 조만강유역 인근에 위치한 강우관측소를 조사하였다. 조만강유역 인근에는 3개의 강우관측소가 있고(표 3.11), 이 연구에 사용할 강우자료는 김해공항기상대의 시간 단위 강우량 자료이다(그림 3.8). 김해공항기상대의 자료를 선택한 이유는 기상청 산하의 관측소로서 자료의 신뢰도가 높기 때문이다.

증발량 자료는 김해공항기상대의 일평균 증발량 자료에 증발접시계수

(=0.7)를 곱하여 사용한다.

표 3.11 조만강유역 인근의 가용한 강우관측소 현황

관할기관	관측소명	관측기종	위치	자료가용년도
국토해양부	김해	T/M	경상남도 김해시 봉황초교	1987~2008
국토해양부	명지	T/M	부산광역시 강서구 명지동 명지초교	1989~2008
기상청	김해공항기상대	자기	부산광역시 대저 2동 김해국제공항 내	1990~2008

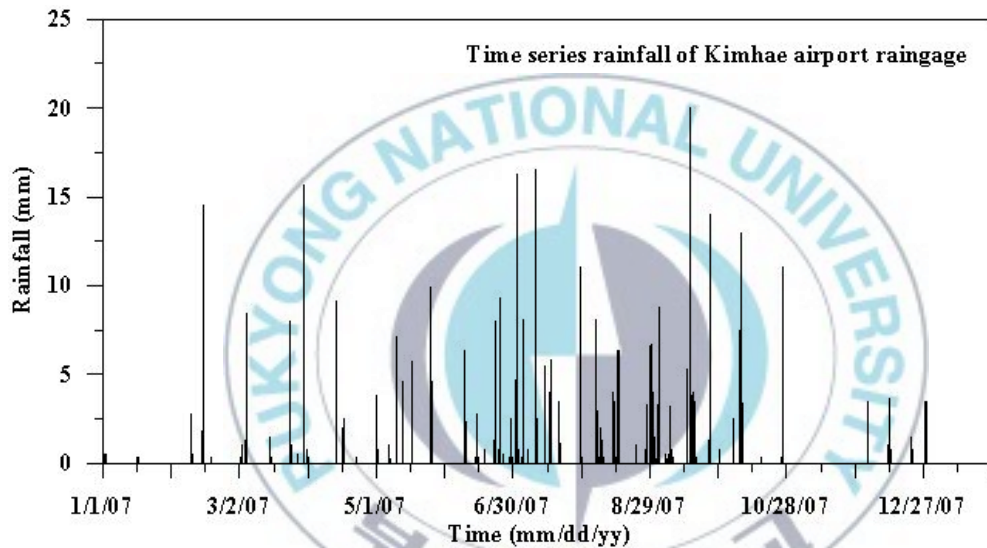


그림 3.8 김해공항기상대의 시간단위 강우주상도

3.4.2 유량 및 수질자료

모형 보정에 가용한 자료가 있는 지점은 총 세 개 지점이며 그림 3.9에 나타내었다. 측점 1~3의 경우, 2007년 6월~2007년 10월까지 건기 및 강우 시 유량과 수질을 측정하였다. 그러나 유속계 불감지 등의 이유로 유량 측정 자료는 측점 1과 2에서만 가용하다. 수질 측정 자료는 전 지점 가용하며 특히 측점 3의 경우 환경부의 수질 측정망 수질자료를 사용하

여 보정 및 검증한다. 표 3.12는 측정에 사용된 장비이다.

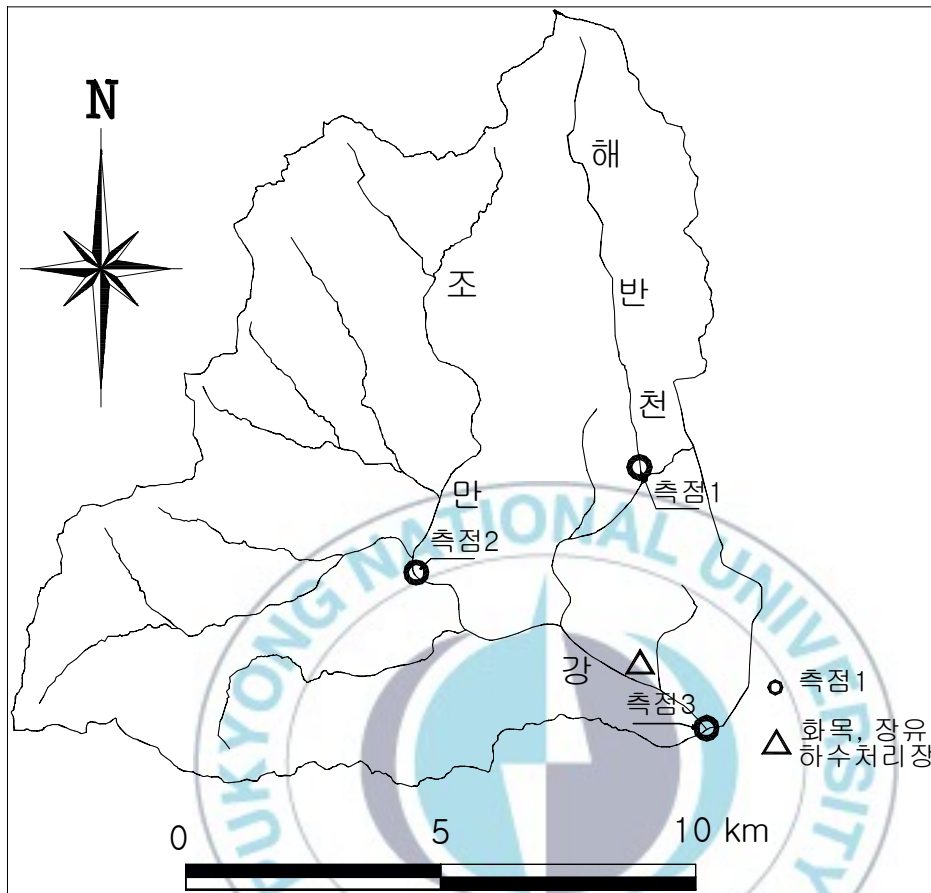


그림 3.9 조만강유역의 측정지점

표 3.12 유량, 수질 측정장비

유량측정장비		수질측정장비	
회전식 유속계		DO meter (YSI 550A)	
Price 유속계			
ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)		pH meter (ELMETR -ON CX-401)	

3.4.3 환경부 수질 측정망 자료

환경부에서 운영하는 조만강하구 지점의 2007년 수질측정 자료를 부산시 보건환경연구원은 통하여 수집했으며 그래프로 나타내었다(그림 3.10).

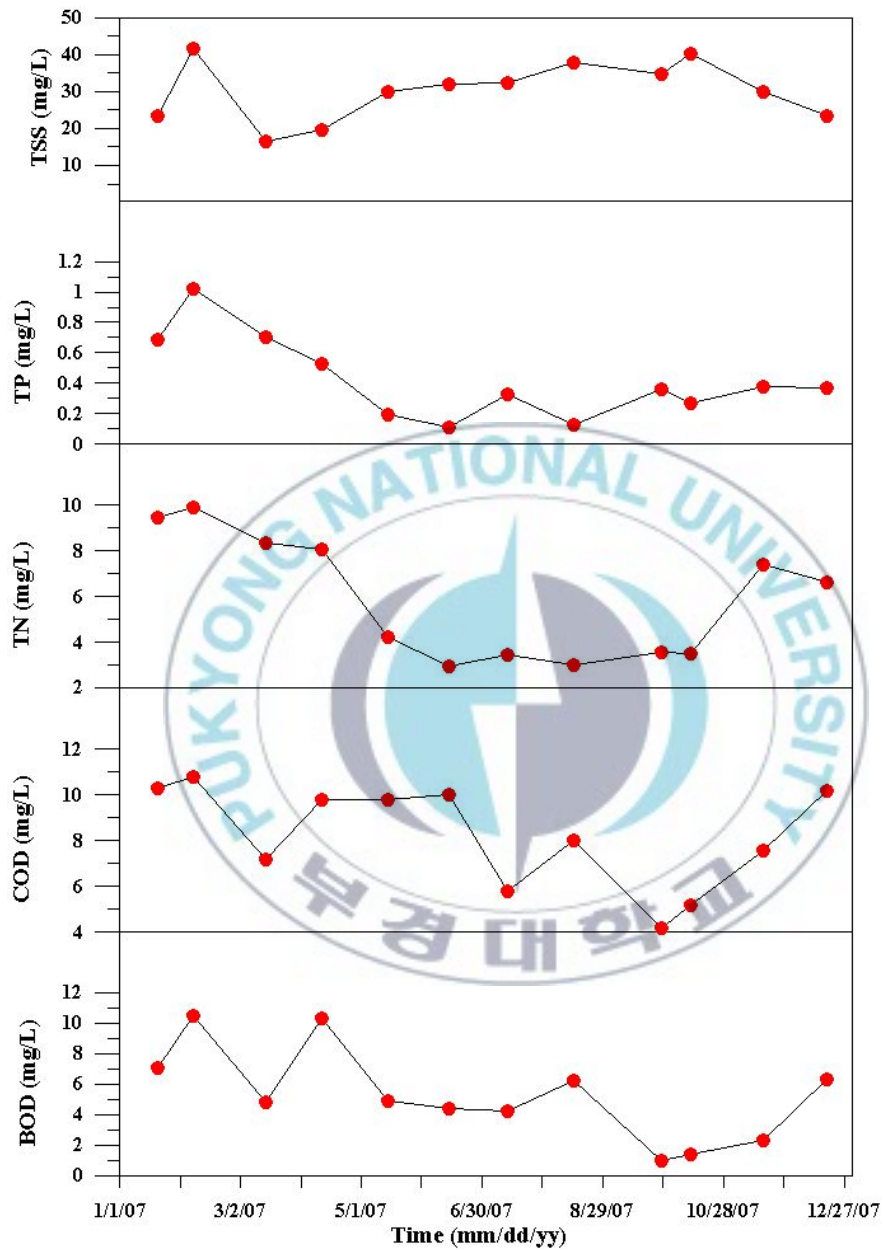


그림 3.10 환경부 수질측정망 서낙동강 3 지점의 수질그래프

3.4.4 화목, 장유 하수처리장의 오염물질 처리율

하수처리장의 방류수 수질 모의를 위하여 화목, 장유 하수처리장의 유입수/방류수 수질분석 자료를 기초로 오염물질 처리율을 산정하였다. 수집된 유입수/방류수 수질분석 자료는 일 단위의 자료이며 일별 처리율을 구한 후 2007년 전체 평균값을 구하여 모형에 적용하였다. 표 3.13은 모형에 적용한 하수처리장의 처리율을 나타낸 것이다.

표 3.13 하수처리장 모의에 사용된 오염물질 처리율

항목	BOD	COD	TN	TP	TSS
	처리율(%)	처리율(%)	처리율(%)	처리율(%)	처리율(%)
화목하수처리장	96	88	72	80	95
장유하수처리장	99	93	82	88	99



4. 하수처리장을 고려한 조만강의 수질모의

4.1 조만강유역의 유출모식도 작성

조만강유역의 유출 및 수질모의를 위하여 유역에 있는 하수처리장, 하도 및 관망, 합류식 하수관거 현황 등을 고려하여 유출모식도를 작성하였다(그림 4.1). 모식도에서 삼각형으로 표시한 것은 합류식하수관거의 간선을 고려하여 분할된 소유역이고, 모든 소유역의 유출 및 오염물질은 절점을 통해 하도 및 관망으로 유입된다.

그런데 네모로 표시된 웨어에 연결된 소유역의 유출량 및 오염물질은 건기에는 하수관거(일점채선)를 통해 흐르며 일정한 양 이상의 유출이 발생할 경우에는 웨어를 월류하여 자연하도로 흐른다.

이렇게 건기에 분리된 흐름 및 오염물질은 하수관거를 통해 하수처리장으로 유입되며 처리된 후 다시 조만강 본류로 방류된다.

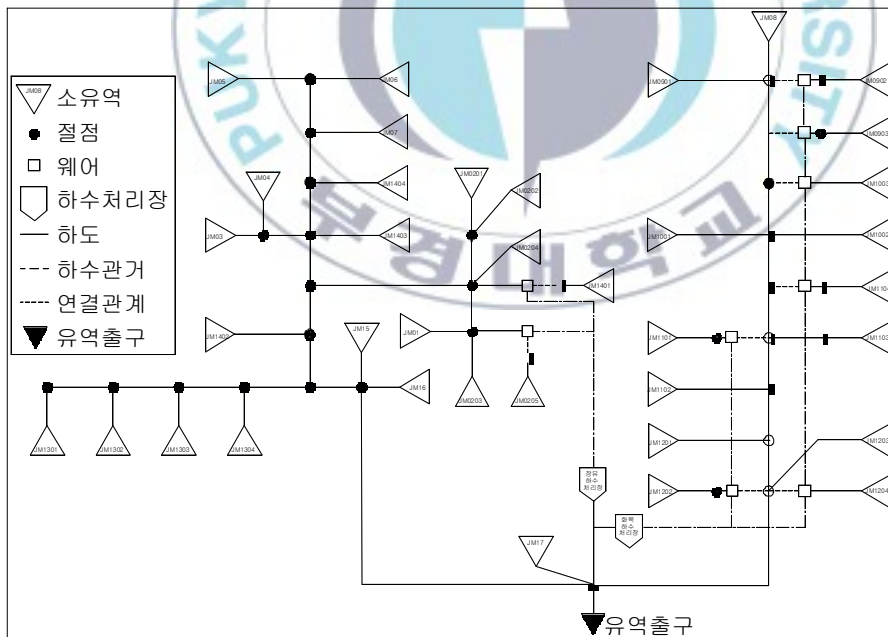


그림 4.1 조만강유역의 유출모식도

4.2 매개변수의 민감도 분석

모형 보정을 위한 전단계로 유출 및 수질 모의에 관계되는 모든 매개변수를 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 분류하였다. 물리적 매개변수는 GIS를 이용하여 명확한 값을 구할 수 있으므로 매개변수 추정 대상이 아니다. 하지만 수문학적 매개변수는 물리적 매개변수에 비해 불명확한 값들이다. 따라서 유출 및 수질의 모의 과정에서 보정해야한다.

본 과업에서는 수문학적 매개변수들에 대하여 적정 매개변수를 기준으로 일정한 범위($\pm 20\%$)씩 단계적으로 변화시키면서 침투유량과 총 유출량에 대한 민감도 분석(sensitivity analysis)을 실시하였다. 이는 모형 보정의 효율성과 정확성을 극대화 시키는 작업이다.

표 4.1~4.3은 SWMM 5 모형의 유출 및 수질 모의와 관련된 매개변수를 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 구분하고, 민감도 분석을 수행할 매개변수를 선택한 표이다.

그림 4.2~4.3은 유역 및 하도/관망 매개변수의 민감도 분석결과 그래프로써 두 경우 모두 SCS CN값이 유출 체적과 침투 유량값의 계산값에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 나머지 매개변수인 투수면적의 조도계수, 불투수면의 조도계수, 투수면적의 지표면 저류량, 불투수면적의 지표면 저류량, 토양의 수리전도도 등은 매개변수 값 변화에 대하여 $\pm 5\%$ 미만의 근소한 유출변화를 일으켰다.

지하수 매개변수는 대수층 관련 매개변수 군과 지하수 흐름 관련 매개변수 군으로 나누어 민감도를 분석하였다. 대수층 매개변수 군의 경우 침투 지하수 흐름에 대한 영향 보다 총 지하수 흐름 양에 대한 영향이 컸다. 매개변수 중 “함수비-수리전도도 곡선의 기울기(HCO)” 매개변수가 총 지하수 유출량에 대해 민감하였으며 매개변수가 증가할수록 총 유출량은 감소하였다(그림 4.4~4.5).

표 4.1 SWMM의 유역 및 하도/관망 매개변수

모의 내용	매개변수 구분		변수명	의미
유출 / 수문 모의	물리적 매개변수 (Physical parameter)	소유역 (Subcatchments) 매개변수	Area	소유역 면적
			%Imperv	불투수 면적비(%)
			Width	유역폭
			Pcnt, Slope	소유역 평균경사(%)
		하도 관망(Conduits) 매개변수	Length	하도, 관망 길이
		절점(Junctions) 매개변수	Invert Elev	절점바닥의 높이
			Max Depth	지표면에서 절점바닥 까지 깊이
	수문학적 매개변수 (Hydrological parameter)	Manning 조도계수	N-Imperv*	유역내 불투수 면의 Manning 조도계수
			N-Perv*	유역내 투수 면의 Manning 조도계수
			Manning N	하도의 Manning 조도계수
		지표면 요지저류량 (Depression storage)	S-Imperv*	불투수 면의 지표면 저류량
			S-Perv*	투수 면의 지표면 저류량
		침투 매개변수 (Infiltration parameter)	MaxRate	최대 침투율
			MinRate	최소 침투율
			Decay	침투 감소계수
			DryTime	포화토의 완전 건조 시간(days)
			MaxInfil	침투 가능한 최대 부피
			Suction	토양의 흡인수두
			HydCon*	포화토의 수리전도도
			IMDmax	토양의 초기 수분 부족량
		SCS curve number	CurveNum *	SCS curve number

참조) * 민감도 분석(sensitivity analysis) 수행대상 매개변수

표 4.2 SWMM의 지하수 매개변수

모의 내용	매개변수 구분		변수명	의미
지하수 모의	대수층 (Aquifers) 매개변수	수문학적 매개변수 (Hydrological parameter)	Porosity*	토양의 간극비(체적비)
			Wilt Point*	토양의 시들음점
			Field Capac*	토양내 모든 자유수가 배수된 후 토양 함수비
			Hyd Cond*	포화토의 수리전도도 (in/hr or mm/hr)
			Cond Slope* (HCO)	함수비-수리전도도 곡선의 기울기
			Tens Slope* (PCO)	함수비-토양 장력 곡선의 기울기
			Upper Evap*	토양상부 비포화 영역의 증발 가능량(fraction)
			Lower Evap*	증발산이 발생 가능한 토양하부 포화영역의
			Lower Loss	최대 깊이(ft or m) 포화 영역에서 침출 지하수로 삼투 되는 비율(in/hr or mm/hr)
			Unsat. Zone Moist*	토양상부 비포화 영역의 함수비
		물리적 매개변수 (Physical parameter)	Bottom Elev	대수층 바닥의 높이 (ft or m)
			Water Table	모의 시작 시 지하수위 (ft or m)
	지하수 (Ground water) 매개변수	수문학적 매개변수	A1*	지하수 흐름 계수
			B1*	지하수 흐름 지수(exponent)
			A2*	지표수 흐름 계수
			B2*	지표수 흐름 지수
			A3*	지표수-지하수 상호작용 계수
		물리적 매개변수	Sur Elev	소유역의 지표면 높이 (ft of m)

참조) * 민감도 분석(sensitivity analysis) 수행대상 매개변수

표 4.3 SWMM의 수질모의 매개변수

모의 내용	매개변수 구분		변수명	의미
수질 모의	물리적 매개변수 (Physical parameter)	오염물 (Pollutants) 매개변수	Name	오염물 이름
			Mass Units	농도의 단위(mg/L or $\mu\text{g/L}$)
			Rain Concen.	강우 중 오염물 농도
			GW Concen.	지하수 중 오염물 농도
			I&I Concen.	유입/침투수 중 오염물 농도
			Decay Coeff.	1차원 감쇠 계수
	수문학적 매개변수 (Hydrological parameter)	축적 (Buildup) 매개변수	Landuse	토지이용 상태
			Pollutant	오염물 이름
			Function Type	축적 함수 형태: (POW, EXP, SAT)
			Coeff1*	축적 함수의 계수
			Coeff2*	축적 함수의 지수
		유실 (Washoff) 매개변수	Coeff3	축적 함수의 계수
			Function Type	유실 함수의 형태: (EXP, RC, EMC)
			Coeff1*	유실 함수의 계수
			Coeff2	유실 함수의 지수
			Cleaning Effic.*	분진 청소 효율
			BMP Effic.*	최적 운영 방법과 관련된 분진 제거 효율

참조) * 민감도 분석(sensitivity analysis) 수행대상 매개변수

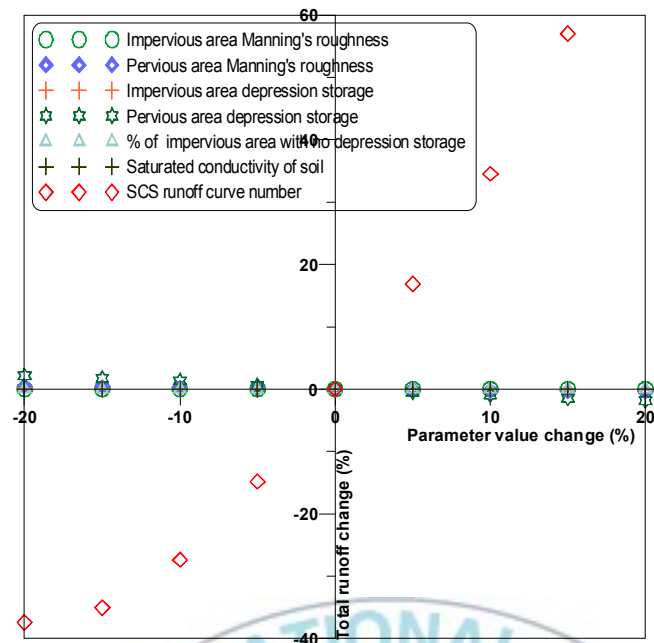


그림 4.2 총 유출량에 대한 유역 및 하도/관망 매개변수의 민감도

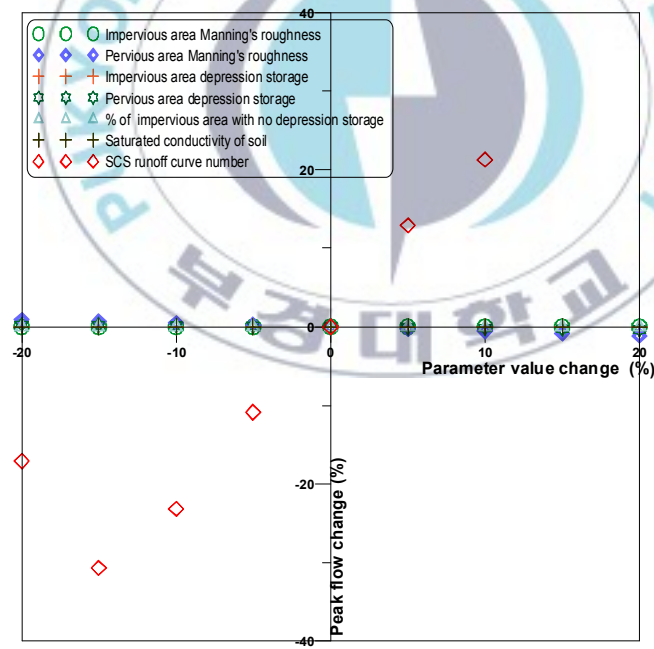


그림 4.3 첨두유량에 대한 유역 및 하도/관망 매개변수의 민감도

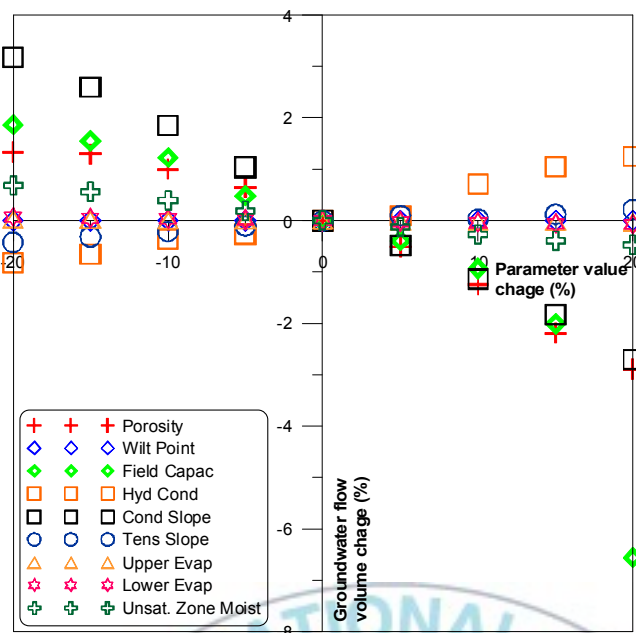


그림 4.4 총 지하수 유출량에 대한 대수층 매개변수의 민감도

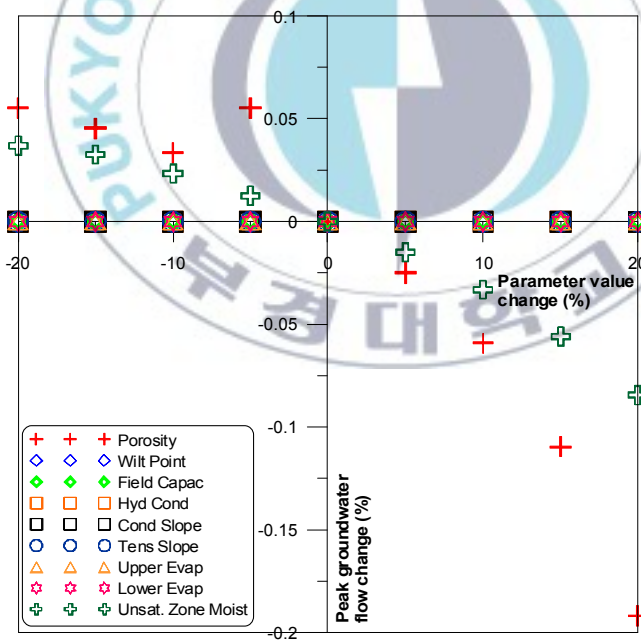


그림 4.5 침투 지하수 유출량에 대한 대수층 매개변수의 민감도

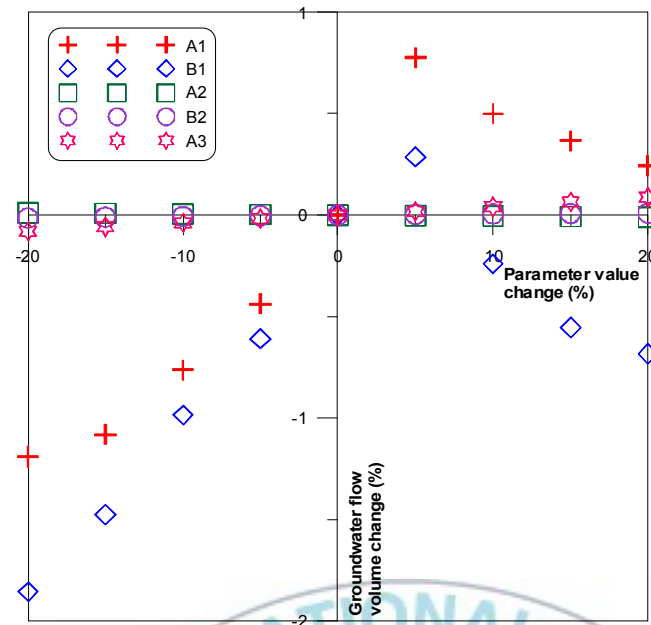


그림 4.6 총 지하수 유출량에 대한 지하수 흐름 매개변수의 민감도

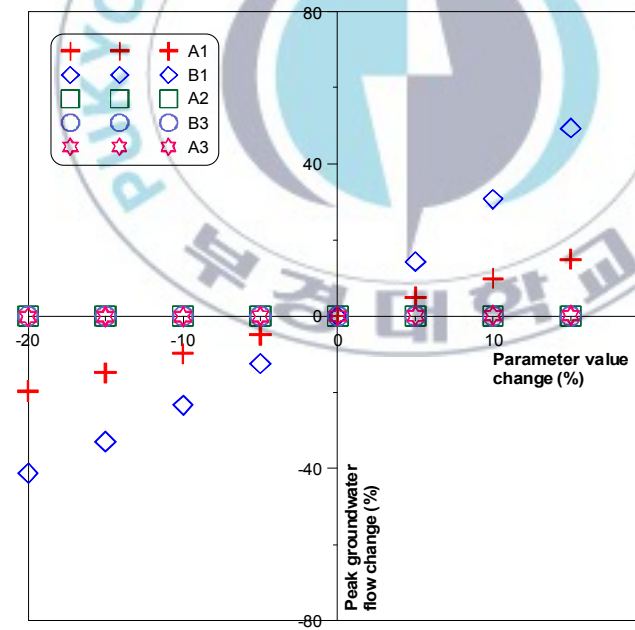


그림 4.7 침투 지하수 유출량에 대한 지하수 흐름 매개변수의 민감도

지하수 흐름 매개변수 군은 총 지하수 유출량에 대한 영향은 미소 하였으나, 침투 지하수 유출량에 대한 영향은 매우 컸다. 그 중 “지하수 흐름 지수(B1)” 매개변수는 침투 지하수 유출량에 대해 가장 민감하였고 값이 증가 할수록 침투 지하수 유출량은 증가하였다(그림 4.6~4.7).

수질 모의 매개변수중에는 축적/유실 함수의 계수와 지수 매개변수를 민감도 분석 하였으며 그 결과는 그림 4.8~4.9에서 확인 할 수 있다. 두 그래프 모두에서 축적/유실 함수의 지수보다 계수값이 오염물 농도의 최대값에 민감하게 작용하였다.



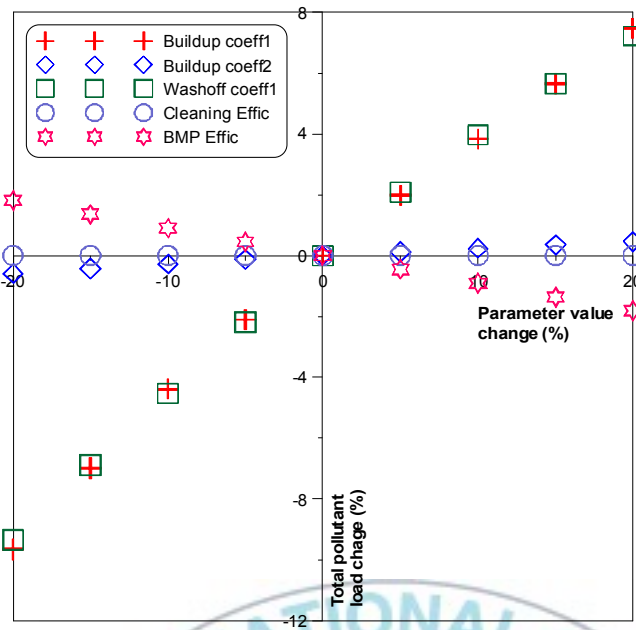


그림 4.8 총 오염물 부하에 대한 수질모의 매개변수의 민감도

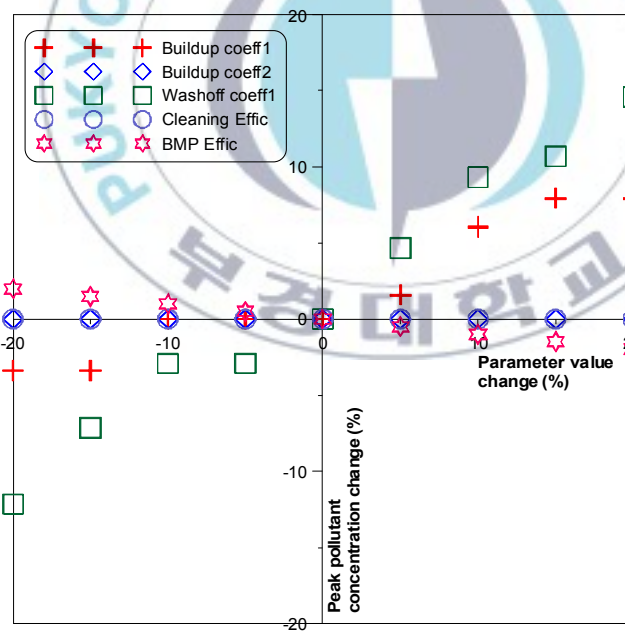


그림 4.9 최대 오염물 농도에 대한 수질모의 매개변수의 민감도

4.3 모형 보정 및 검증

4.3.1 모형 보정

모형의 보정을 위하여 앞서 유량 및 수질을 측정하고, 가용한 자료를 수집하였다. 이를 토대로 측정점 1, 측정점 2, 측정점 3의 세 지점을 대상으로 모형 보정하였다. 표 4.4는 측정점별 위치와 가용자료, 보정 요소를 나타낸 표이다.

표 4.4 조만강유역의 측정점, 가용자료 및 보정 요소

측점명	위치	가용자료 (자료기간)	보정 요소
측점 1	해반천유역 말단	유량, 수질 측정자료 (2007.6.30~2007.10.31)	유량, BOD, COD, TN, TP, TSS
측점 2	조만강 상류 마찰교	유량, 수질 측정자료 (2007.6.30~2007.10.31)	유량, BOD, COD, TN, TP, TSS
측점 3	조만강 하구	수질 측정자료 (2007.6.30~2007.10.31) 환경부 수질측정망 자료 (2007년 전체)	BOD, COD, TN, TP, TSS

1) 측정 1(해반천유역 말단)의 유출 및 수질 보정

그림 4.10은 해반천유역의 유출 수문곡선으로 유량측을 대수논금으로 표시하였다. 계산유량의 최대값은 31.25 m³/sec이고, 모의 기간 중 2007년 10월 8일 오후 12:00에 발생하였다. 그림 4.11은 해반천유역의 수질 모의 곡선이며 계산된 오염물질별 최대농도 및 평균농도는 표 4.5에 요약하였다.

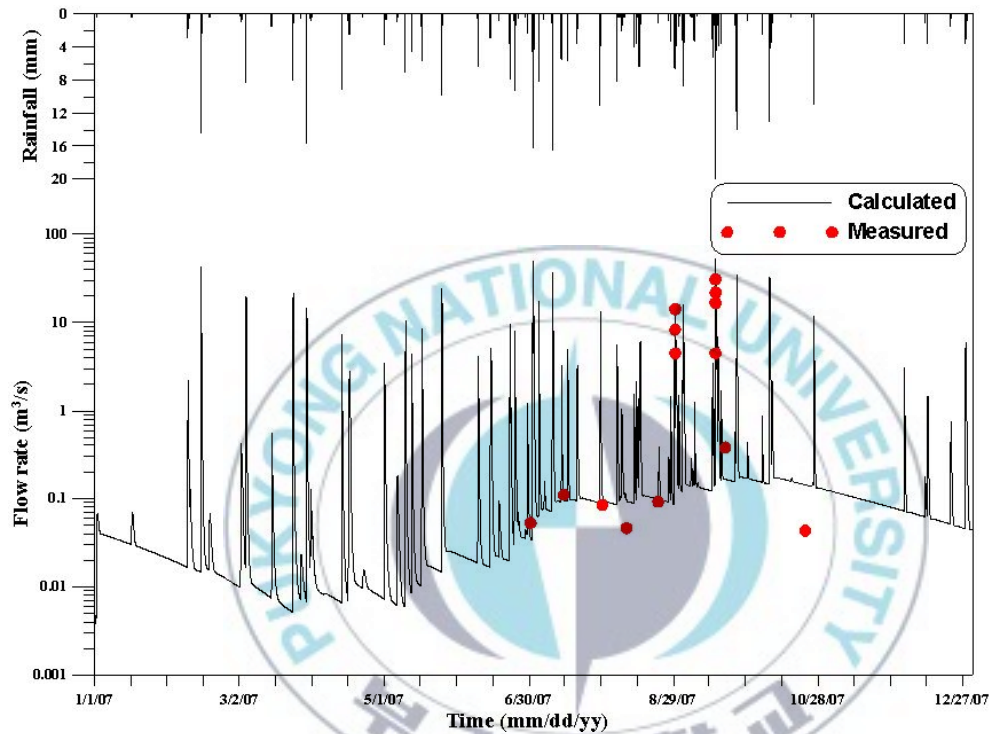


그림 4.10 해반천유역의 유출 수문곡선

표 4.5 해반천의 수질모의 결과 분석(STATISTICS 블록 사용)

	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)
최대	25.14	48.56	47.80	1.50	998.15
평균	3.03	6.03	5.01	0.16	101.40

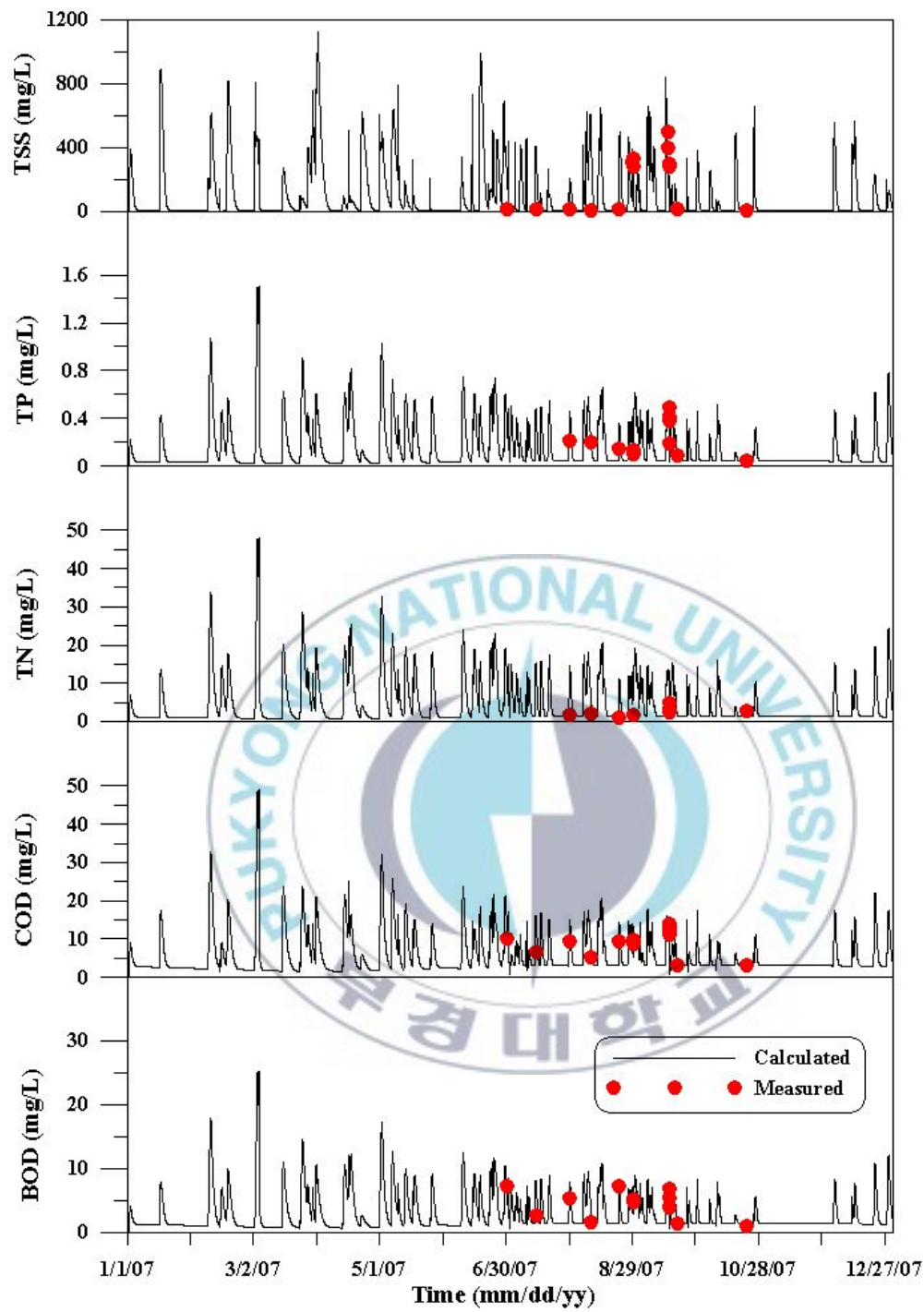


그림 4.11 해반천의 수질모의 곡선

2) 측점 2(조만강 상류 마찰교 지점)의 유출 및 수질 보정

그림 4.12는 조만강 상류의 유출 수문곡선으로 유량축을 대수눈금으로 표시하였다. 계산유량의 최대값은 $66.04 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 모의 기간 중 2007년 9월 16일 오후 13:00에 발생하였다. 그림 4.13은 조만강 상류 마찰교 지점의 수질 모의 곡선이며 계산된 오염물질별 최대농도 및 평균농도는 표 4.6에 요약하였다.

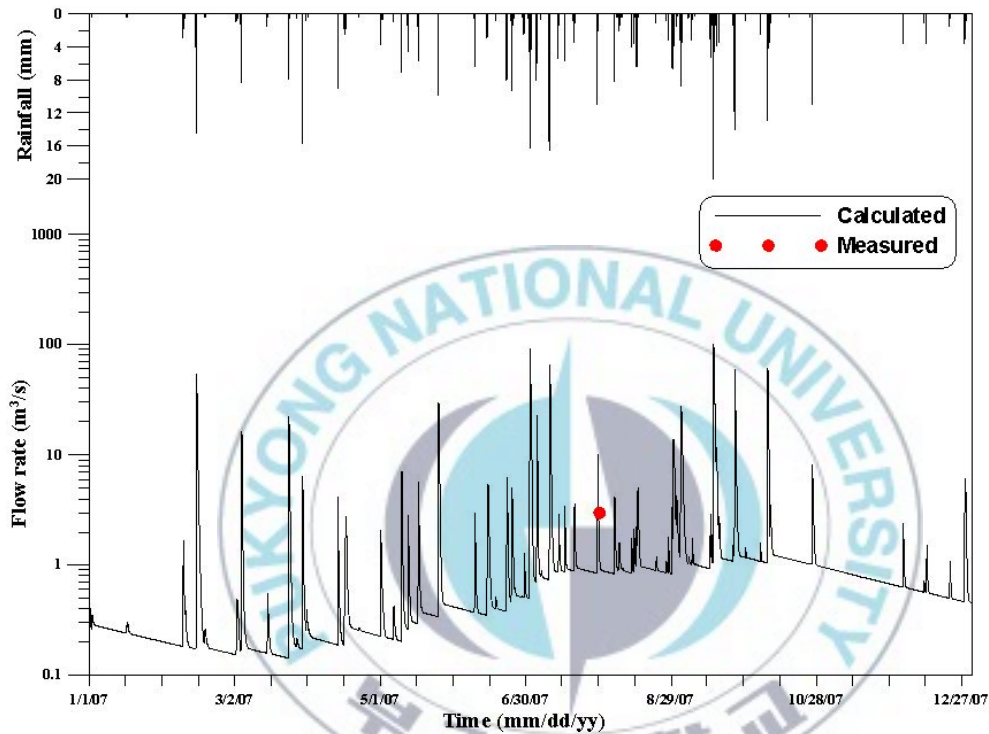


그림 4.12 조만강 상류 마찰교 지점의 유출 수문곡선

표 4.6 조만강 상류의 수질모의 결과 분석(STATISTICS 블록 사용)

	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)
최대	44.25	81.12	88.15	2.75	4709.30
평균	2.83	5.32	4.67	0.15	77.94

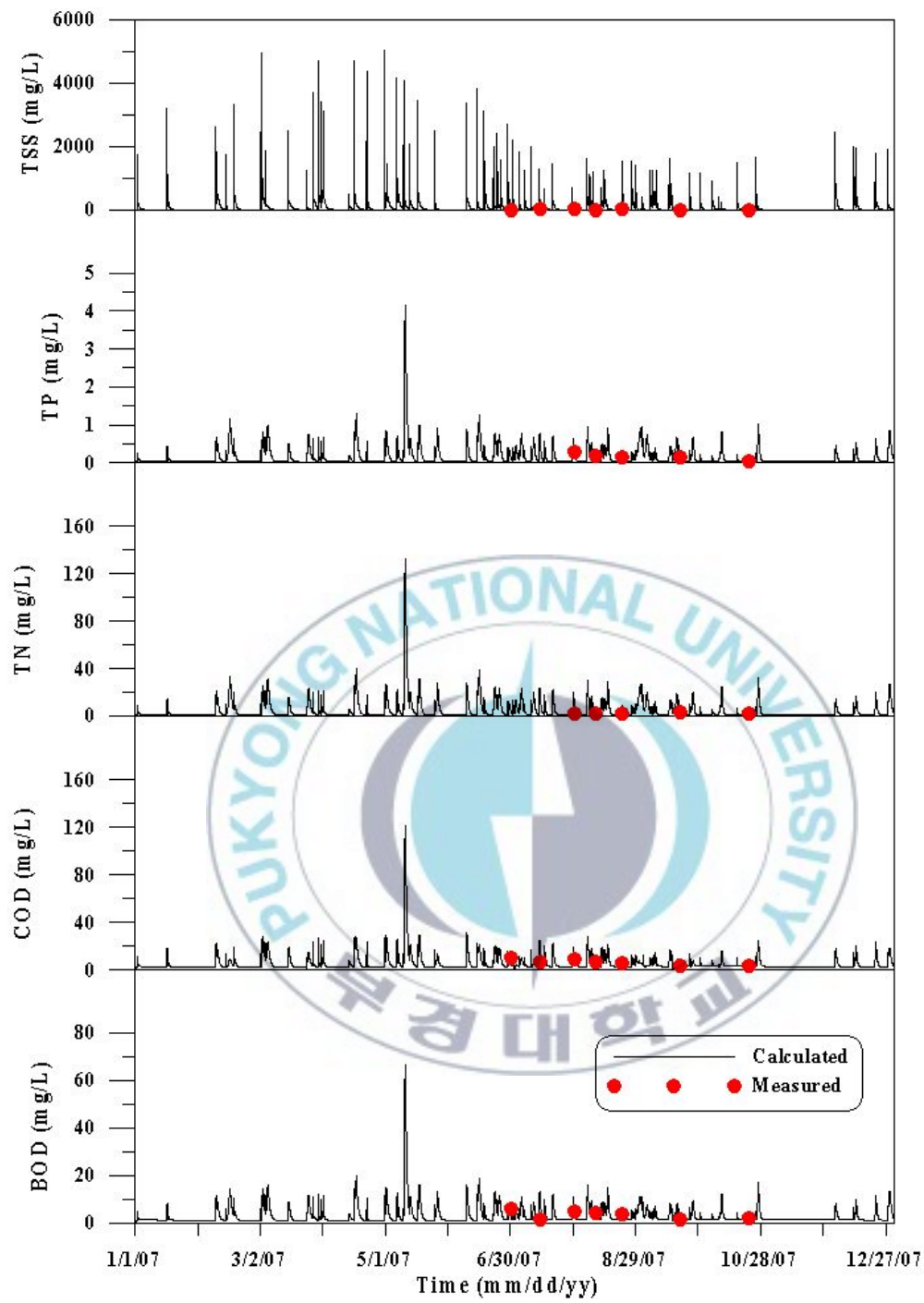


그림 4.13 조만강 상류 마찰교지점의 수질모의 곡선

3) 측점 3(조만강 하구)의 유출 및 수질 보정

그림 4.14는 조만강 하구의 유출 수문곡선으로 유량축을 대수눈금으로 표시하였다. 계산유량의 최대값은 $153.39 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 모의 기간 중 2007년 9월 16일 오후 13:00에 발생하였다. 그림 4.15는 조만강 하구의 수질 모의 곡선이며 계산된 오염물질별 최대농도 및 평균농도는 표 4.7에 요약하였다.

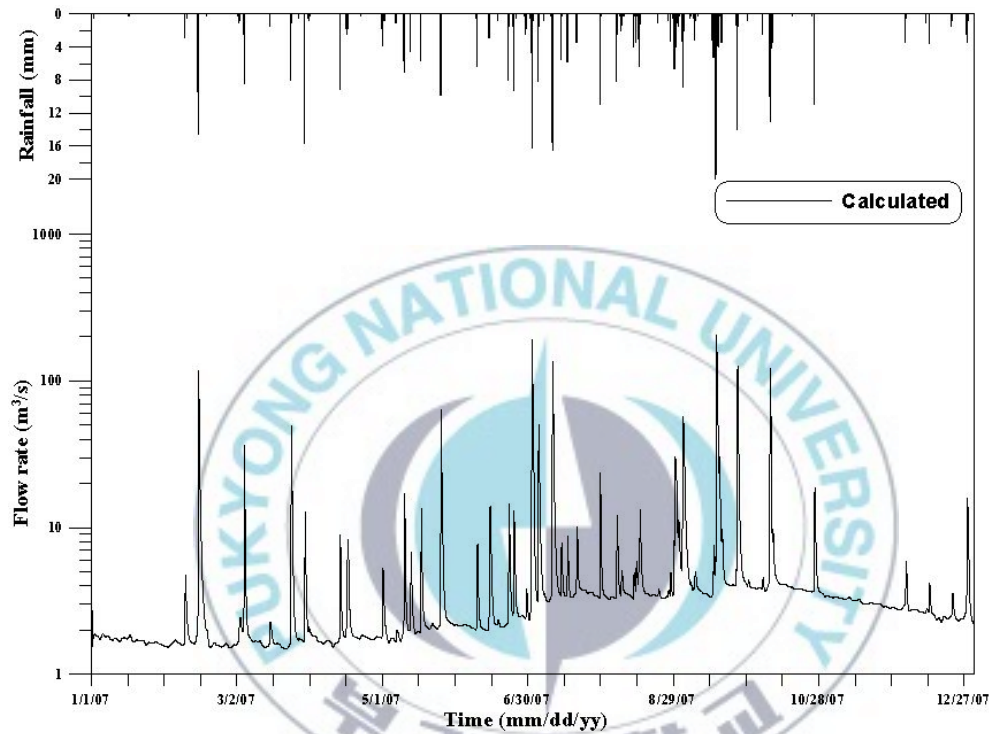


그림 4.14 조만강 하구의 유출 수문곡선

표 4.7 조만강 하구의 수질모의 결과 분석(STATISTICS 블록 사용)

	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)
최대	22.22	40.26	42.76	1.36	940.49
평균	3.83	7.36	7.31	0.45	51.70

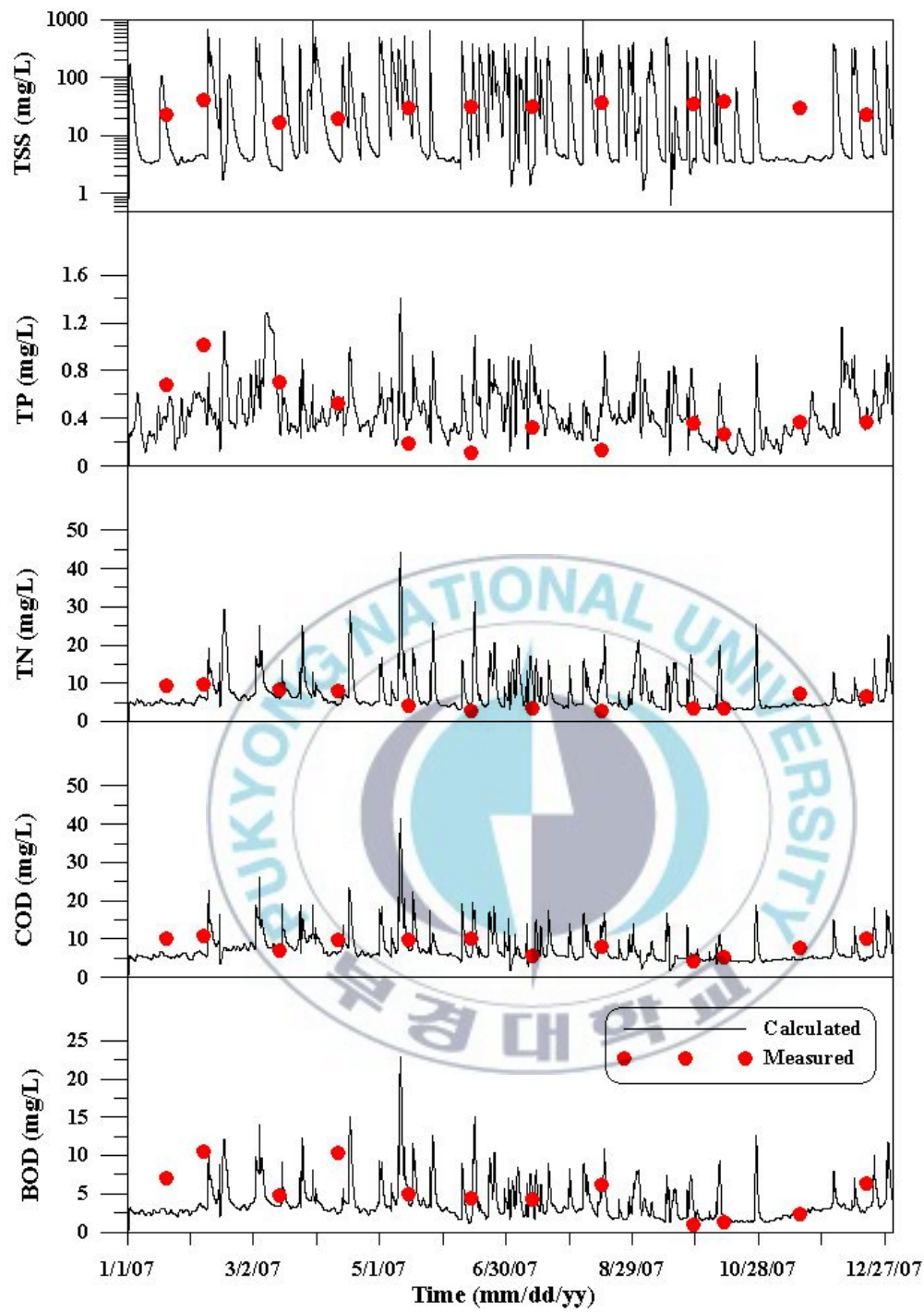


그림 4.15 조만강하구의 수질모의 곡선

4.3.2 모형 검증

모형의 검증은 측점 1에서만 실시하였으며 그 이유는 측점 2와 측점 3은 유량측정자료를 얻을 수 없기 때문이다. 검증을 위한 유량 및 수질측정은 2008년 6월 28일의 강우사상에 대하여 수행하였다. 그림 4.16은 측점 1의 유출량모의 검증곡선이고 그림 4.17은 오염물질모의 검증곡선이다. 기상청 AWS(Automatic Weather System)의 30분 단위 강우자료를 사용하였으며 최대유량이 11.95 m^3/sec 로 관측값 11.53 m^3/sec 과 4 %차이가 나는 매우 양호한 계산결과를 얻었다.

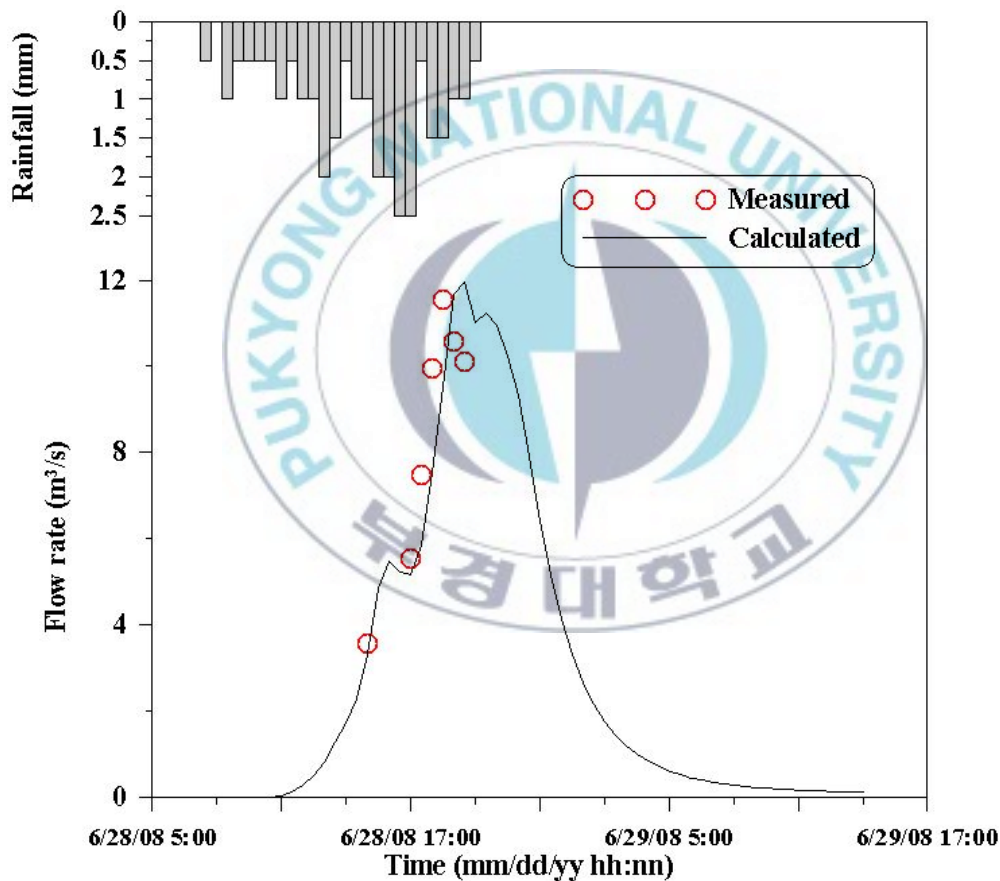


그림 4.16 측점 1(해반천)의 유출모의 검증곡선

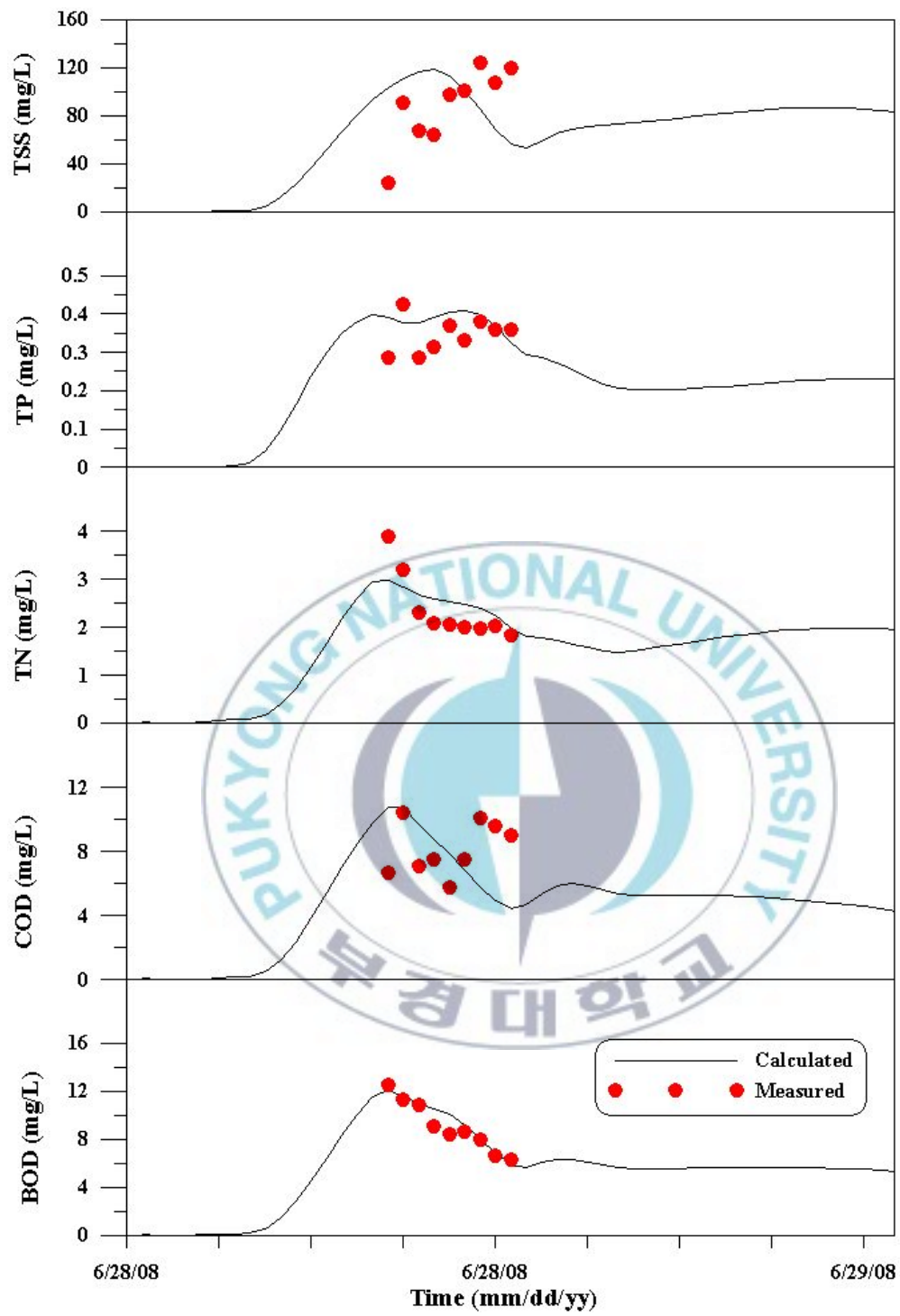


그림 4.17 측정점 1(해반천)의 수질모의 검증곡선

4.4 하수처리장을 고려한 유출 및 수질모의

조만강유역에 있는 화목하수처리장과 장유하수처리장을 모형화하고 수질을 모의하였다. 하수처리장으로 유입되는 유량은 하수관거에 의해 차집되는 유량이다. 그리고 유입수의 오염물 농도를 하수처리장으로 유입하는 관거의 직상류 절점에 입력하였다. 오염물의 처리율을 고려하여 모형에 입력하였으며, 보정에는 유출수의 수질자료를 사용하였다.

그리고 모의결과의 적합도를 평가하기 위하여 몇 가지 통계량을 선정하고 오염물질별 모의 결과를 확인하였다.

4.4.1 통계량 분석

시간에 따른 모의결과를 비교하기 위해 Gupta 등(1999)이 제시한 세 가지 통계량으로 평가하였다.

통계량은 제공된 평균오차(root mean square error; RMSE), 평균 편차의 비율(percent bias; PBIAS), Nash-Sutcliffe 효율성 지수(Nash-Sutcliffe efficiency; NSE)이며 통계량에 관계된 식은 다음과 같다(식 4.1~4.3).

$$RMSE = \sqrt{1/N \sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2} \quad (4.1)$$

$$PBIAS = \sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim}) / \sum_{t=1}^N q_t^{obs} \times 100 \% \quad (4.2)$$

$$NSE = 1 - \sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2 / \sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q^{mean})^2 \quad (4.3)$$

여기서, q_t^{sim} 은 t시간의 모의농도(mg/L), q_t^{obs} 는 관측농도(mg/L), N은

관측자료의 수, q^{mean} 은 관측농도의 평균(mg/L)이다.

첫 번째 통계량인 RMSE의 단위는 mg/L이고, 최적값은 '0' 이다. 두 번째 통계량인 PBIAS의 단위는 %이고, NSE는 무차원이다.

RMSE는 단순히 모형 예측 오차의 평균편차를 계산하는 것이며, 값이 작을수록 모형의 성능이 더 좋을 것을 나타낸다. PBIAS는 모의항목의 농도가 관측된 농도에 비해 크거나 작은 정도에 대한 평균적인 경향을 측정한다. 최적값의 경우 '0' 이고, 양수인 경우 과소추정, 음수인 경우 과대추정되는 방향으로 모형의 오차가 발생함을 의미한다. NSE는 관측값의 분산에 대한 잔차 분산의 상대적인 크기에 대한 척도이고, 최적값은 '1' 이다(강신욱과 이상호, 2007).

4.4.2 화목하수처리장의 수질모의

그림 4.18은 화목하수처리장의 BOD모의곡선이다. RMSE는 1.21로 모의되었고, PBIAS는 -3.86 %로 적절하였다. NSE는 0.74로 모의되어 적절하였다.

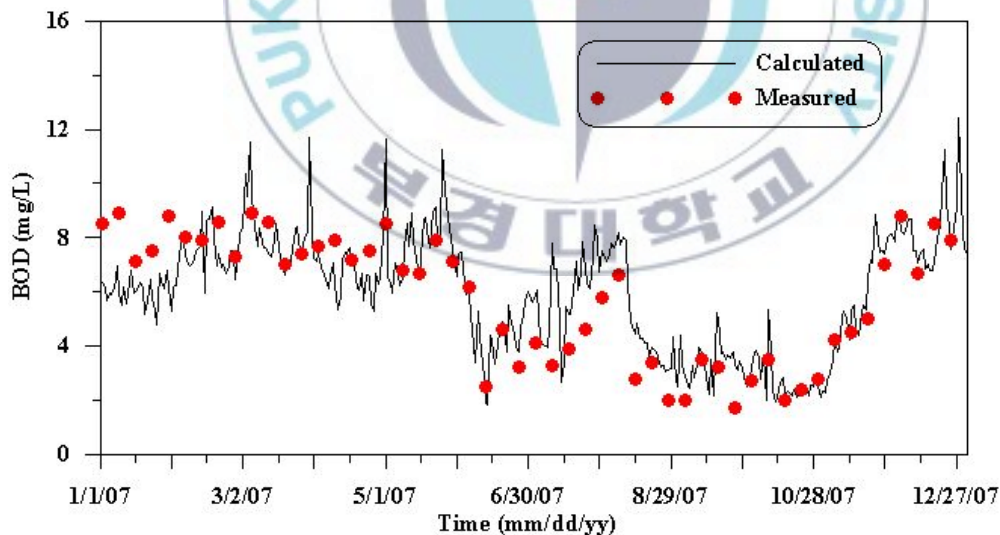


그림 4.18 화목하수처리장의 BOD모의곡선

그림 4.19는 화목하수처리장의 COD모의곡선이다. RMSE는 1.97로 모의 되었고, PBIAS는 -1.96 %로 적절하였다. NSE는 0.63로 모의되어 적절하였다.

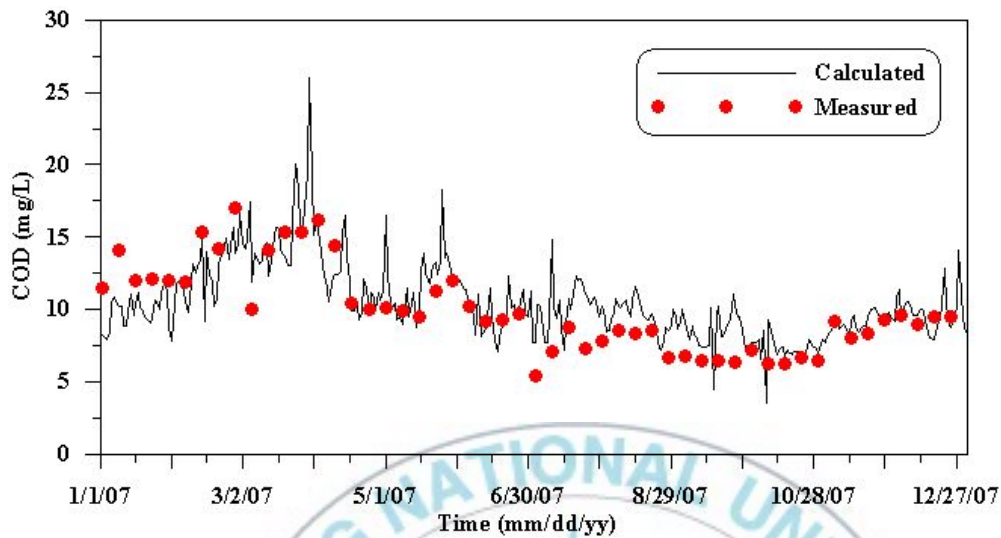


그림 4.19 화목하수처리장의 COD모의곡선

그림 4.20은 화목하수처리장의 TN모의곡선이다. RMSE는 1.79로 모의 되었고, PBIAS는 -0.92 %로 적절하였고, NSE는 0.56으로 적절하였다.

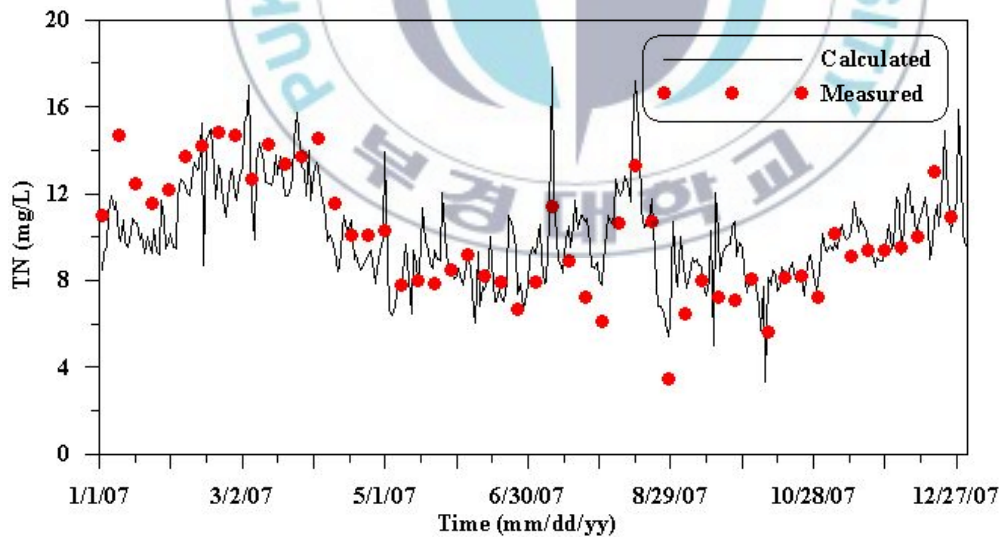


그림 4.20 화목하수처리장의 TN모의곡선

그림 4.21은 화목하수처리장의 TP모의곡선이다. RMSE는 0.22로 모의되었고, PBIAS는 11.15 %로 다소 과소하게 모의된 것으로 나타났다. NSE는 0.71로 모의되어 적절하였다.

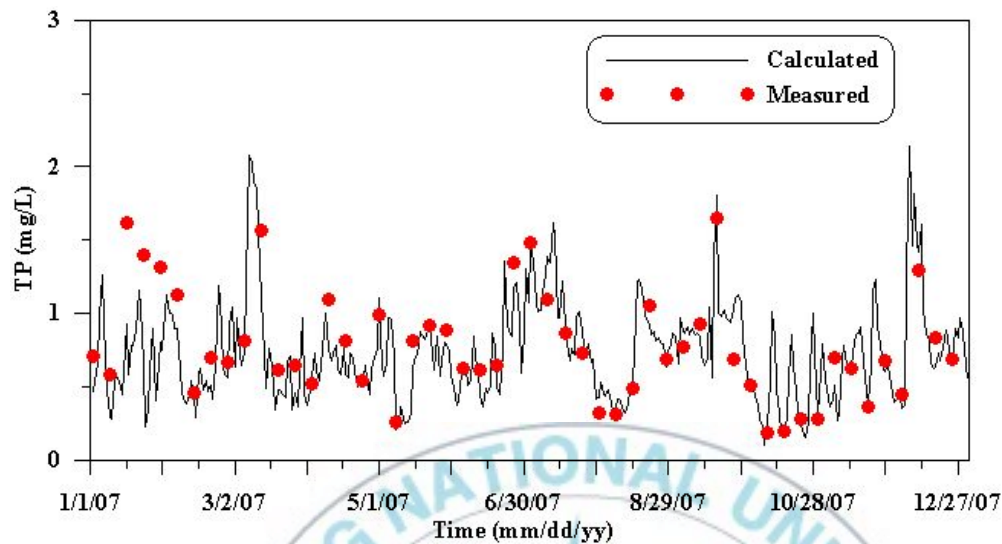


그림 4.21 화목하수처리장의 TP모의곡선

그림 4.22는 화목하수처리장의 TSS모의곡선이다. RMSE는 17.31로 모의되었고, PBIAS는 -84.03 %로 관측값에 비하여 크게 모의된 것으로 나타났다. NSE는 -61.67로 모의되었다.

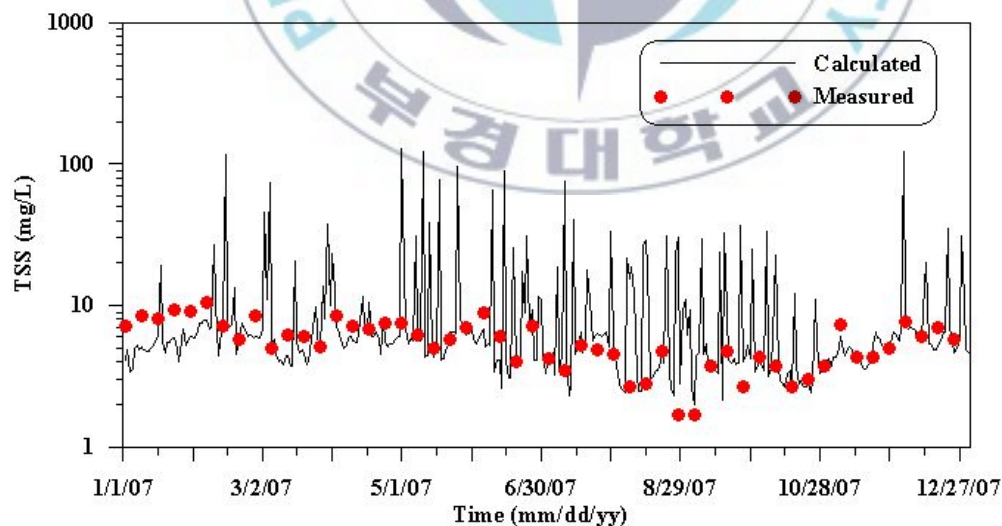


그림 4.22 화목하수처리장의 TSS모의곡선

4.4.3 장유하수처리장의 수질모의

그림 4.23은 장유하수처리장의 BOD모의곡선이다. RMSE는 0.47로 모의되었고, PBIAS는 -0.19 %로 적절하였다. NSE는 -0.11로 모의되었다.

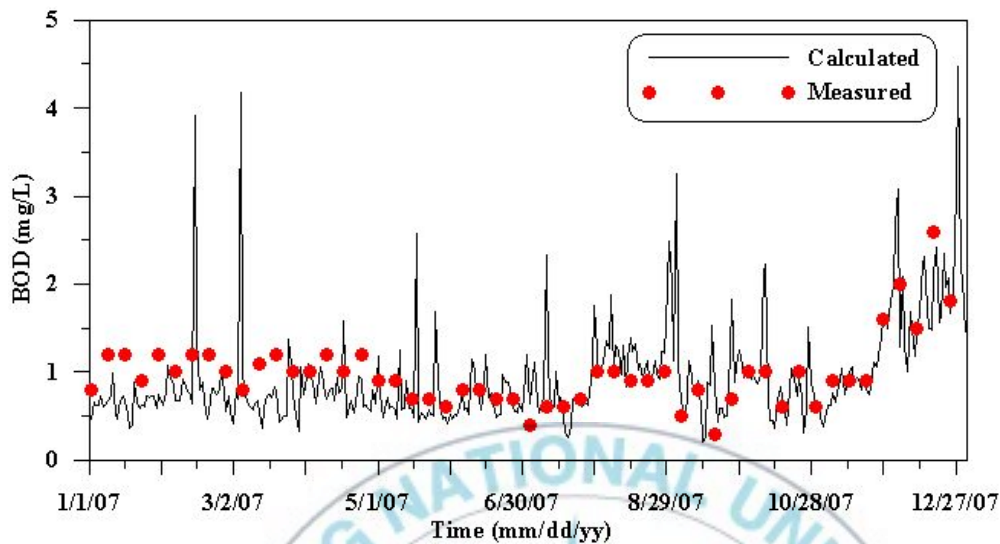


그림 4.23 장유하수처리장의 BOD모의곡선

그림 4.24는 장유하수처리장의 COD모의곡선이다. RMSE는 2.91로 모의되었고, PBIAS는 -1.79 %로 적절하였다. NSE는 -5.09로 모의되었다.

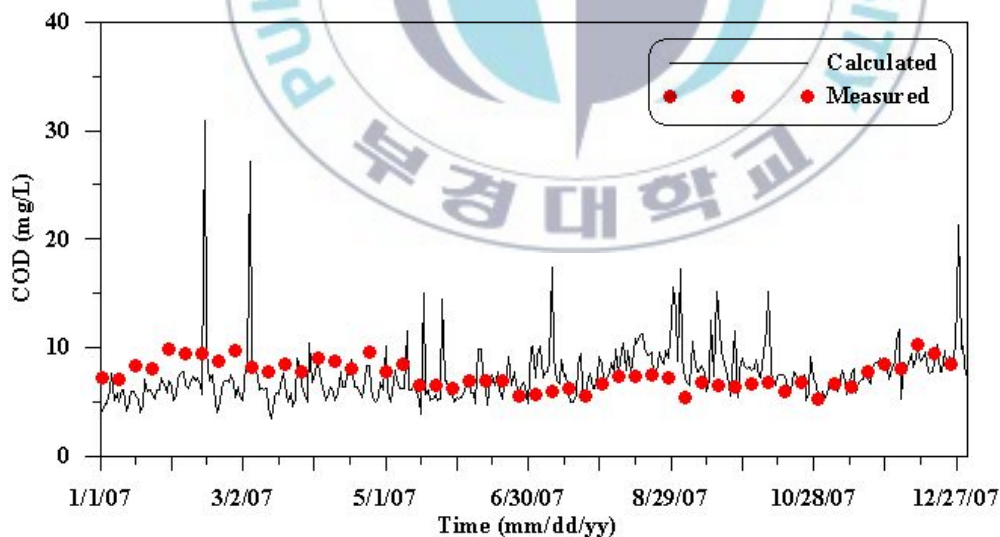


그림 4.24 장유하수처리장의 COD모의곡선

그림 4.25는 장유하수처리장의 TN모의곡선이다. RMSE는 2.57로 모의되었고, PBIAS는 0.35로 적절하였다. NSE는 -4.15로 모의되었다.

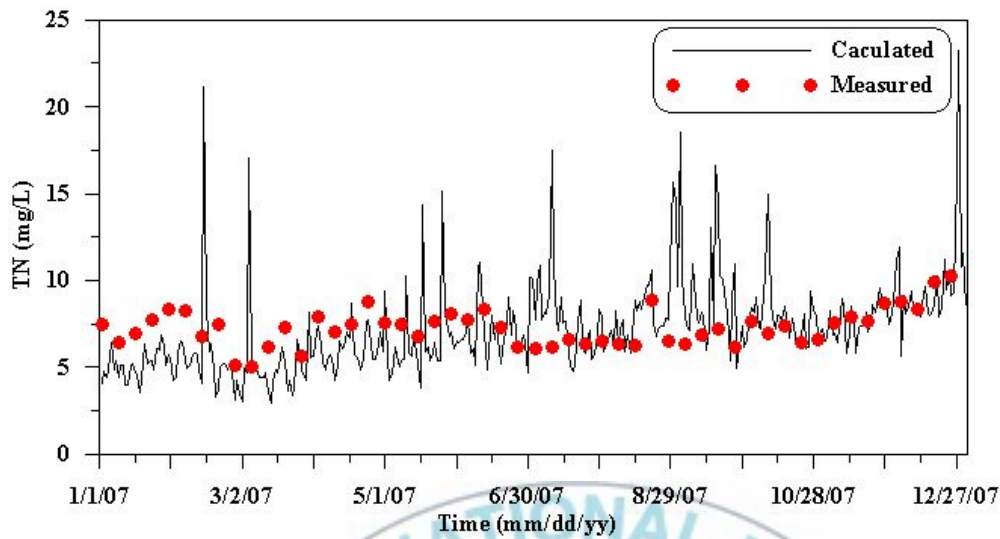


그림 4.25 장유하수처리장의 TN모의곡선

그림 4.26은 장유하수처리장의 TP모의곡선이다. RMSE는 0.39로 모의되었고, PBIAS는 14.32로 다소 작게 모의되었다. NSE는 -0.18로 모의되었다.

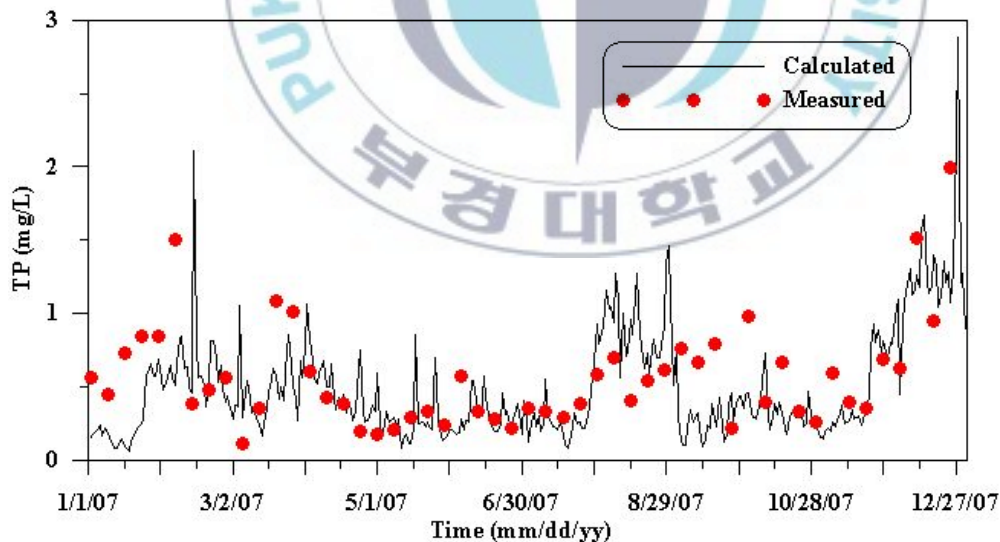


그림 4.26 장유하수처리장의 TP모의곡선

그림 4.27은 장유하수처리장의 TSS모의곡선이다. RMSE는 4.78로 모의되었고, PBIAS는 -67.50로 다소크게 모의되었다. NSE는 -22.75로 모의되었다.

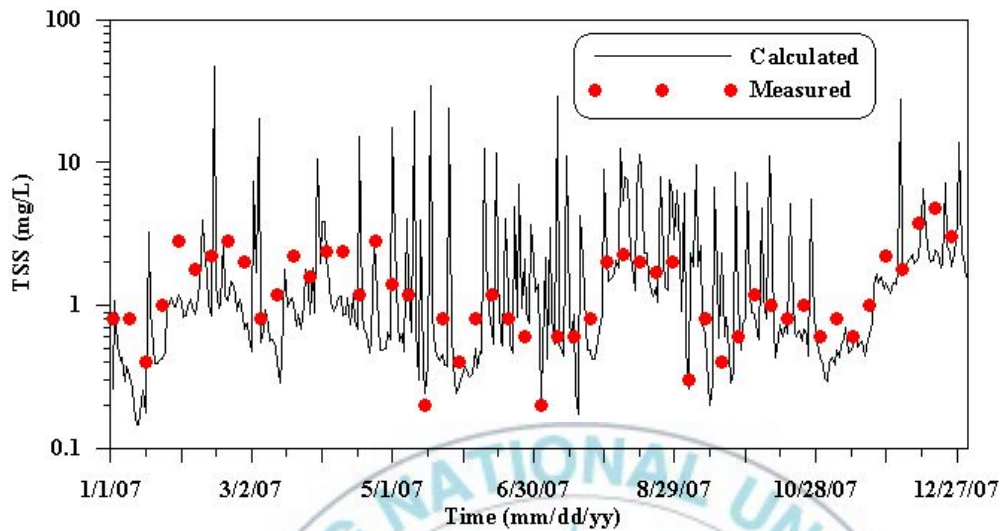


그림 4.27 장유하수처리장의 TSS모의곡선

화목하수처리장, 장유하수처리장의 수질모의 결과의 위의통계량을 표 4.8에 요약하였다.

표 4.8 화목, 장유하수처리장의 수질모의 결과의 통계량

	수질항목	RMSE	PBIAS	NSE
화목 하수 처리장	BOD	1.21	-3.86	0.74
	COD	1.97	-1.96	0.63
	TN	1.79	-0.92	0.56
	TP	0.22	11.15	0.71
	TSS	17.31	-84.03	-61.67
장유 하수 처리장	BOD	0.47	-0.19	-0.11
	COD	2.91	-1.79	-5.09
	TN	2.57	0.35	-4.15
	TP	0.39	14.32	-0.18
	TSS	4.79	-67.50	-22.75

4.5 하수처리장 증설 계획을 반영한 수질모의

4.5.1 하수처리장 증설계획

동지역(해반천유역)의 발생하수를 처리하기 위해 설치된 화목하수처리 시설은 하수처리용량 114,000 m³/day로 2000년 3월에 준공하여 가동 중이며 처리수를 조만강으로 방류하고 있다. 그러나 2004년 1월 1일부터 강화된 수질기준과 오염총량관리 시행계획상 수질기준을 준수하지 못하고 있는 실정이므로 현재 31,000 m³/day의 시설용량 증설공사가 계획 중이고 2025년에는 145,000m³/일의 시설용량을 갖추게 된다. 표 4.9와 그림 4.28은 화목하수처리장의 시설용량 및 증설계획이다.

표 4.9 화목하수처리장의 시설용량 및 증설계획(김해시, 2007)

구 분	2005년	2010년	2015년	2020년	2025년
발생하수량 (m ³ /day)	104,333	108,359	110,574	112,847	115,179
시설용량 (m ³ /day)	114,000	145,000	145,000	145,000	145,000
증설계획 (m ³ /day)	-	31,000	-	-	-

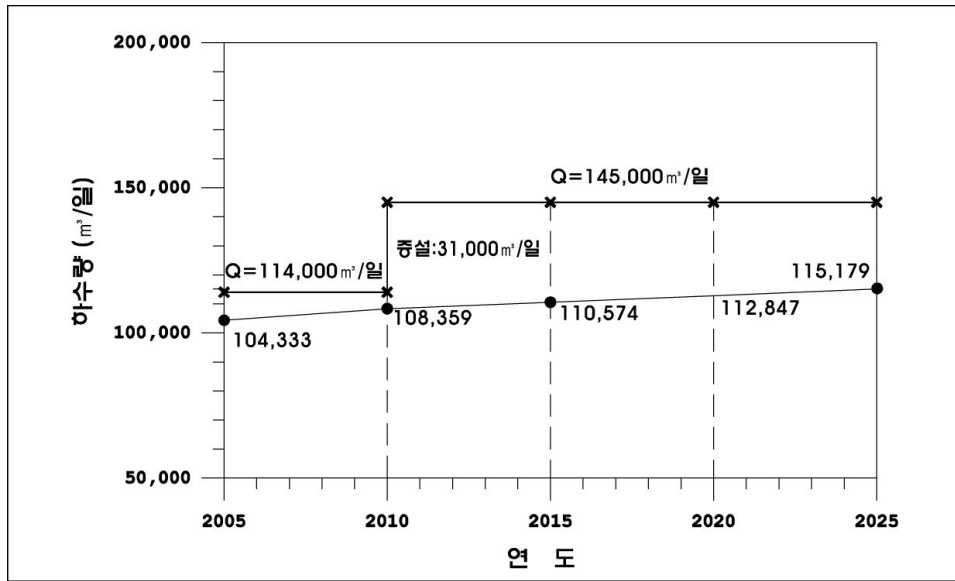


그림 4.28 화목하수처리장의 현재하수처리용량과 증설후의 하수처리용량(김해시, 2007)

장유하수처리장은 주촌면 및 장유면의 발생하수를 처리하기 위하여 2004년 12월에 개량공사를 완료하여 현재 가동 중이다. 그리고 2025년까지 증설계획이 수립되어있지 않다(김해시, 2007). 표 4.10과 그림 4.29는 장유하수처리장의 시설용량 및 증설계획이다.

표 4.10 장유하수처리장의 시설용량 및 증설계획(김해시, 2007)

구 분	2005년	2010년	2015년	2020년	2025년
발생하수량 (m³/day)	31,529	47,059	82,494	88,584	90,230
시설용량 (m³/day)	97,000	97,000	97,000	97,000	97,000
증설계획 (m³/day)	-	-	-	-	-

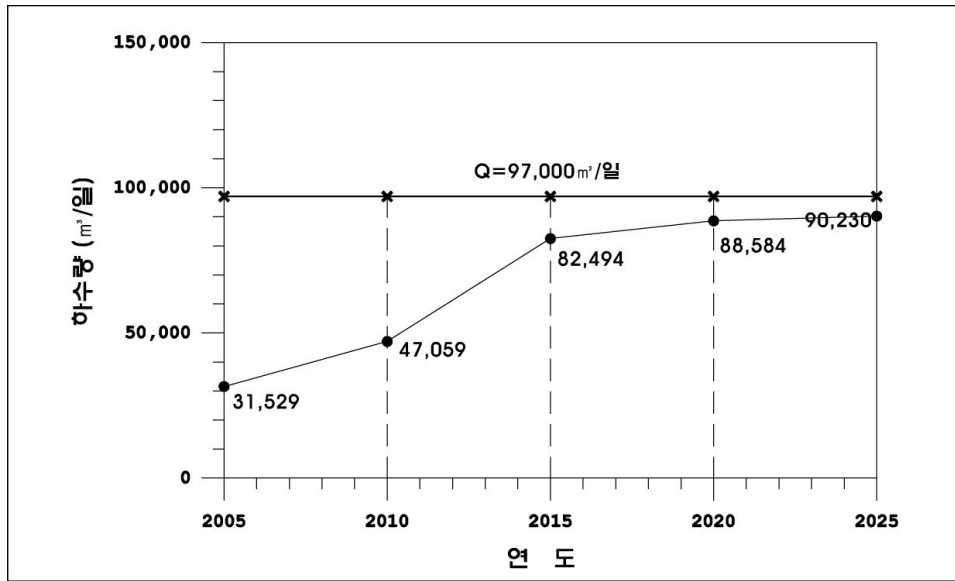


그림 4.29 장유하수처리장의 현재하수처리용량과 증설후의 하수처리용량(김해시, 2007)

4.5.2 증설계획을 고려한 하수처리장의 수질모의

화목하수처리장에 대하여 하수량 증가와 처리용량 증설계획을 모형에 반영하여 모의한 결과를 기존 하수량과 기존 하수처리장의 용량을 고려하여 모의한 결과와 비교하였다. 표 4.11은 하수처리장 증설에 따른 방류수의 오염물농도 저감률을 나타낸 것이며 그림 4.30~4.34는 화목하수처리장의 두 가지 모의결과를 비교하여 도시한 것이다. 하수처리장 증설에 따른 농도 저감률은 오염물질 별로 30.7~33.0 % 였으며 TSS의 저감률이 33.0 %로 가장 크게 모의되었다.

표 4.11 하수처리장증설에 따른 방류수 농도저감률

항목	평균 농도 저감률 (%)
BOD	32.7
COD	32.0
TN	30.6
TP	31.3
TSS	33.0

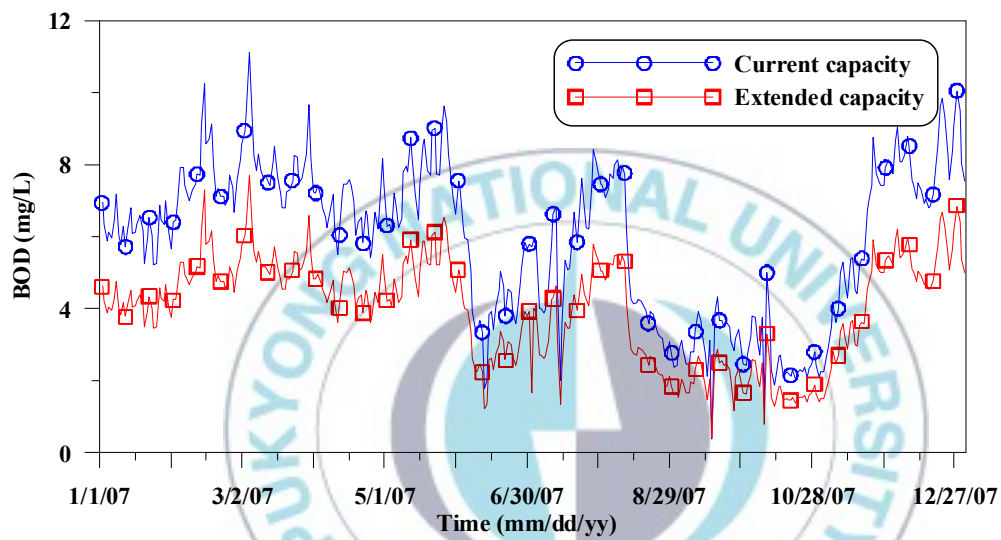


그림 4.30 화목하수처리장의 증설에 따른 BOD농도변화

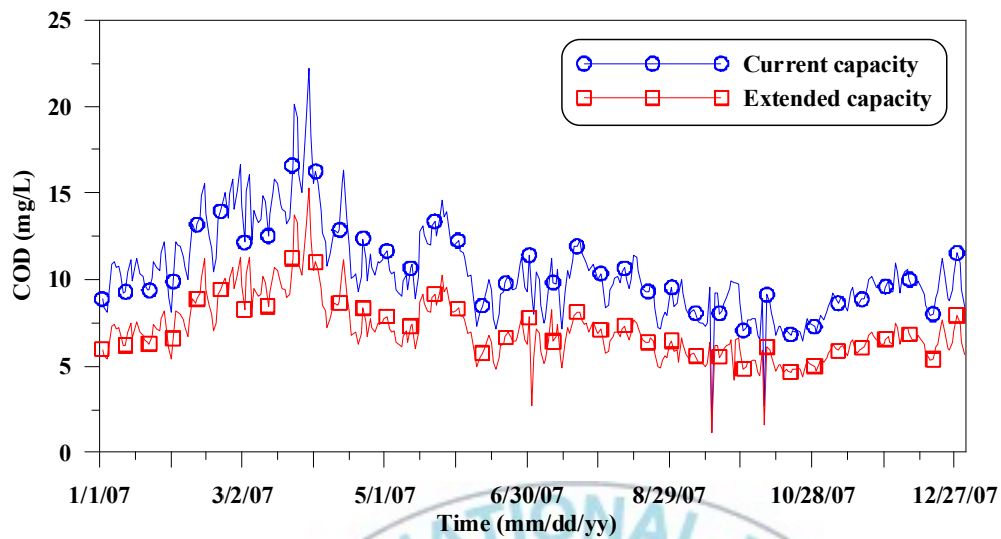


그림 4.31 화목하수처리장의 증설에 따른 COD농도변화

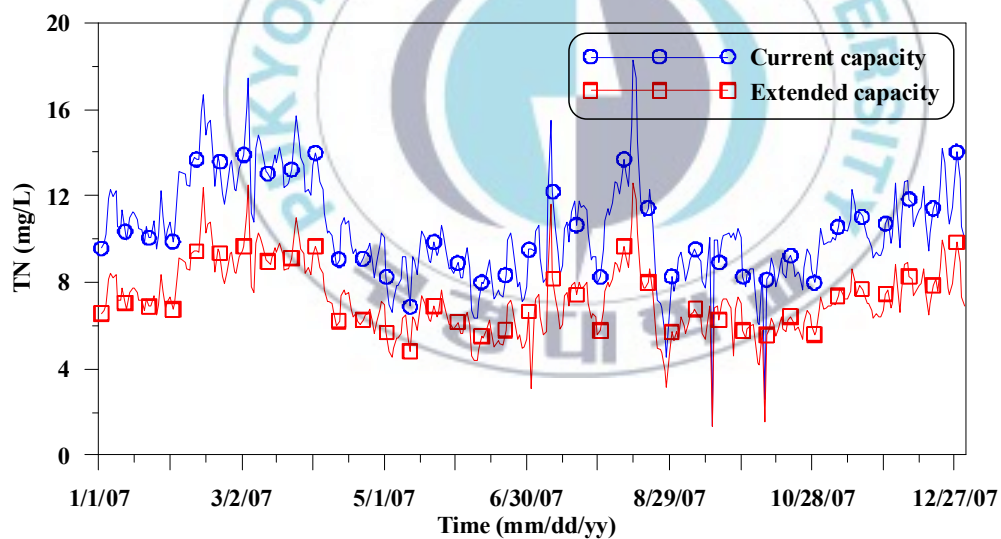


그림 4.32 화목하수처리장의 증설에 따른 TN농도변화

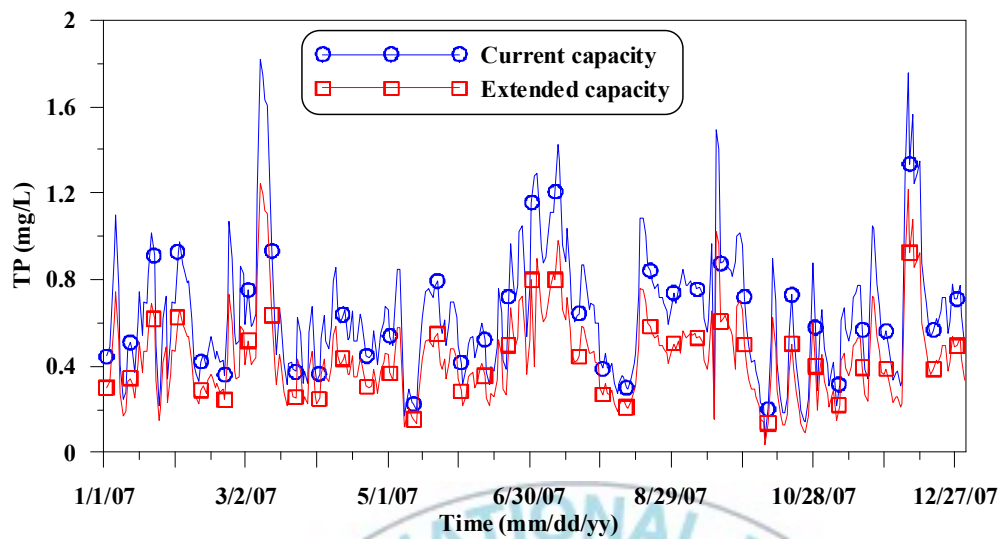


그림 4.33 화목하수처리장의 증설에 따른 TP농도변화

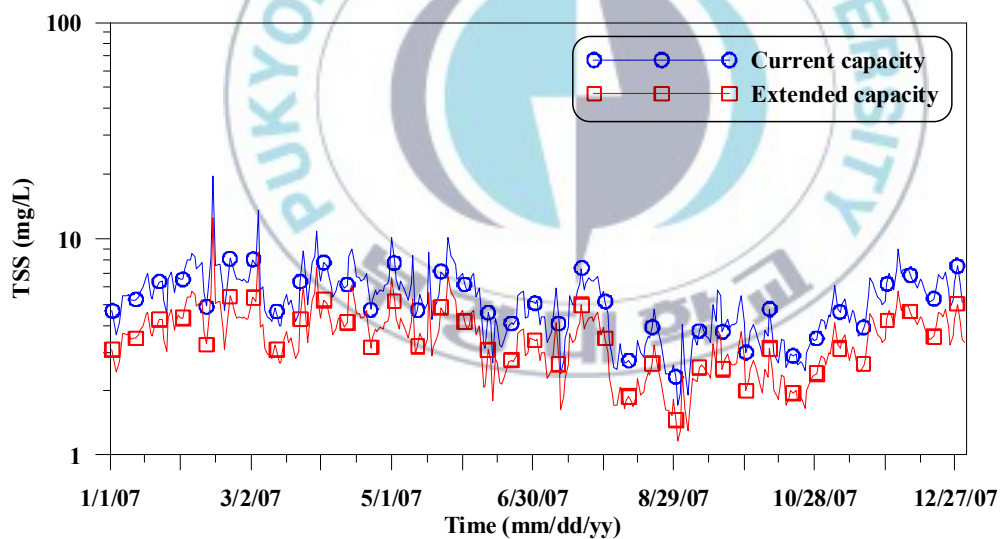


그림 4.34 화목하수처리장의 증설에 따른 TSS 농도변화

4.5.3 조만강하구의 수질에 대한 영향

조만강하구에서 장유하수처리장의 하수량 증가, 화목하수처리장의 증설과 하수량 증가에 따른 오염물질 농도의 변화를 모의해 보았다. 이는 2010년과 2025년을 기준으로 예측된 하수량 증가를 반영한 모의이다. 모의 결과를 표 4.12에 정리하였다. 여기서 주목할 점은 2010년을 기준으로 예측된 하수량을 반영한 모의결과는 오염물 농도 저감효과가 4.1~27.2%로 나타났으나, 2025년을 기준으로 예측된 하수량을 반영한 모의결과는 COD, TN, TP의 농도가 악화되는 것으로 나타났다. 이는 장유하수처리장의 용량과 처리율이 현재의 상태로 유지되고, 하수의 유입량만 증가하는 계획하의 모의 결과이다. 그림 4.35~4.39는 측점 3에서 오염물질별 농도변화를 나타낸 것이며 2010년을 기준으로 예측된 하수량을 반영한 결과를 도시한 것이다.

표 4.12 하수처리장 증설에 따른 조만강하구의 오염물질별 저감률

항목	하수량 반영 기준년도	
	2010	2025
	평균 농도 저감률 (%)	
BOD	27.2	25.0
COD	9.1	-7.2
TN	7.0	-10.0
TP	4.1	-16.7
TSS	21.6	20.7

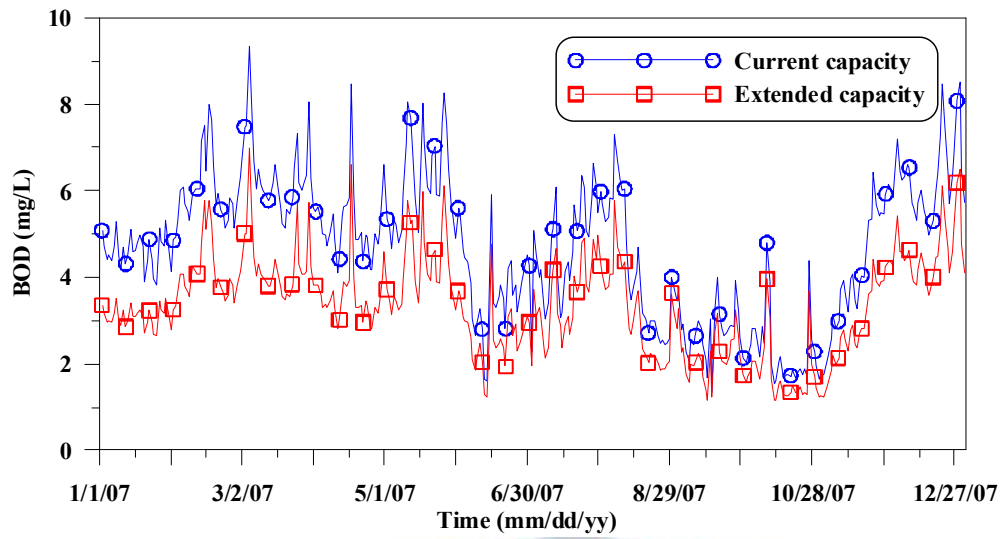


그림 4.35 측정점 3(조만강하구)의 화목하수처리장
증설에 따른 BOD농도변화(2010년)

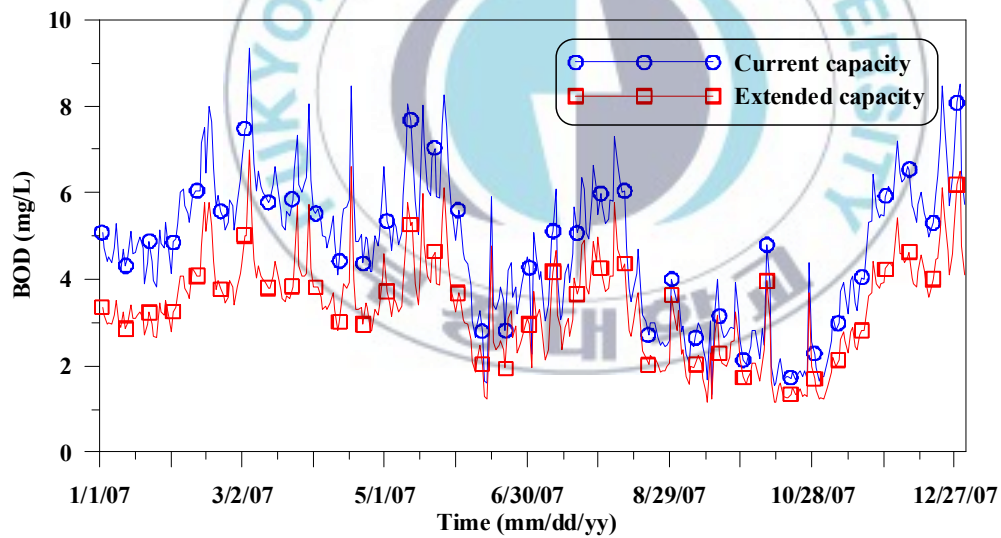


그림 4.36 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른
COD농도변화(2010년)

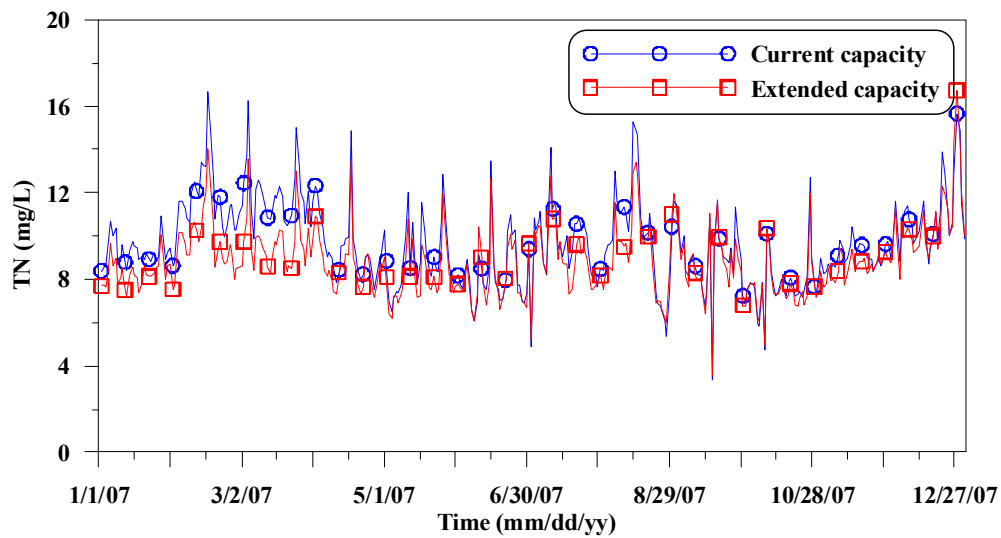


그림 4.37 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른
TN농도변화(2010년)

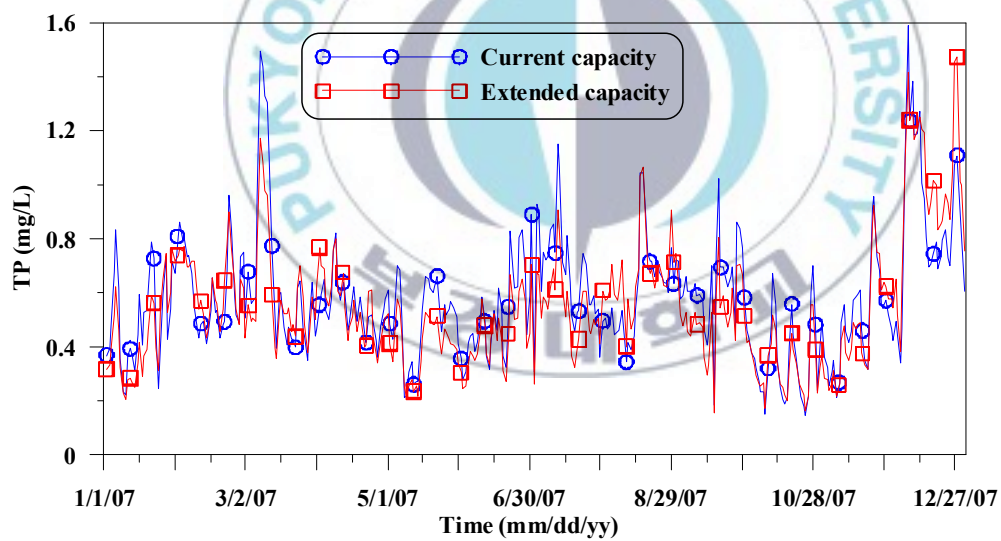


그림 4.38 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른
TP농도변화(2010년)

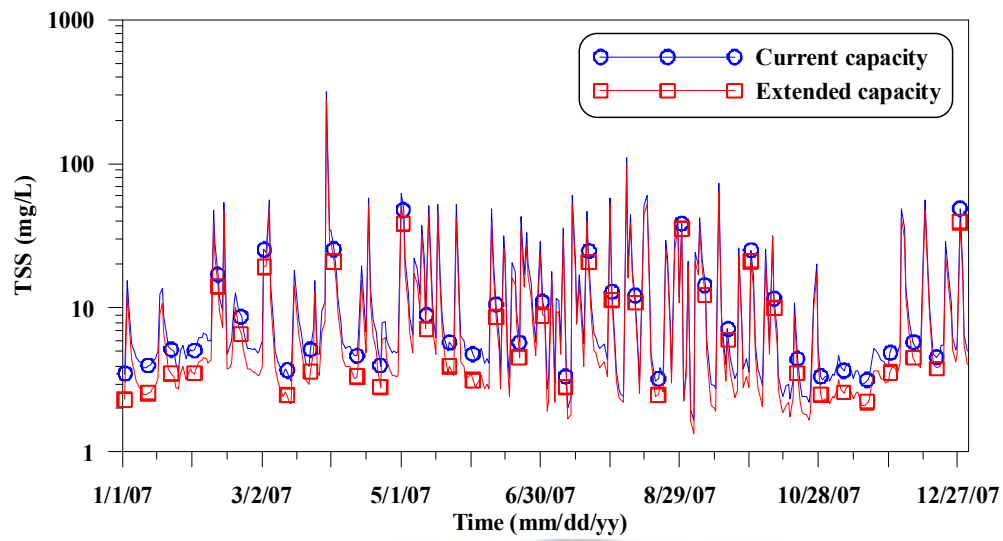


그림 4.39 조만강하구의 화목하수처리장 증설에 따른
TSS농도변화(2010년)



5. 결론 및 향후 연구과제

5.1 결론

조만강을 대상으로 SWMM 5를 적용하기 위하여 조만강유역의 합류식 하수관거, 지형정보, 하수처리장현황 등을 파악하여 모형의 입력자료를 추출하였다. 이를 바탕으로 37개의 소유역으로 분할된 조만강유역의 유출 및 수질 모형을 구축하였다. 구축된 모형에는 도시지역 합류식 하수관거의 차집형태와 하수처리장을 포함하였다.

SWMM 5 모형의 유역, 하도/관망, 수질 매개변수들에 대하여 민감도 분석을 실시하였으며 이는 보정과정의 효율성과 정확성을 높이기 위해서이다. 분석결과 SCS CN, “함수비-수리전도도 곡선의 기울기(HCO)”, “지하수 흐름 지수(B1)” 등의 매개변수가 지표·지하 유출, 수질변화의 계산 값에 대하여 민감하였다.

모형의 보정은 지점 1(해반천), 지점 2(조만강 상류), 지점 3(조만강 하구)에서 유출 및 수질(BOD, COD, TN, TP, TSS)에 대하여 실시하였다. 또한 모형의 검증은 유출 및 수질자료를 측정하여 지점 1에서만 실시하였다.

그리고 하수처리장을 고려한 유출 및 수질모의는 하수처리장의 방류수 수질 자료를 이용하여 보정하였다. 보정결과를 통계분석한 결과 화목하수처리장의 모의는 TSS를 제외하고 11 %이하의 오차를 보였다. 또한 장유하수처리장의 모의결과는 통계량 중 NSE의 값이 음수로 계산되었고, TSS를 제외하고 14 %이하의 오차를 보였다.

두 하수처리장의 모의에서 모두 TSS의 모의결과가 좋지 않은 이유는 SWMM에서 입력하는 하수처리장의 처리율은 고정되어 있지만 TSS의 농도는 강우 사상의 발생과 강도에 따라 크게 증감하기 때문이다.

그리고 장유하수처리장의 하수량 증가, 화목하수처리장의 증설과 하수량 증가에 따른 조만강하구의 오염물질 농도 변화를 모의해 보았다. 하수량은 각각 2010년, 2025년을 기준으로 예측된 하수량이 사용되었으며 2010년 기준하수량을 사용한 모의결과 오염물질별로 4.1~27.2 %의 오염저감효과가 있었다. 2025년을 기준으로 예측된 하수량을 입력할 경우 COD, TN, TP의 농도는 악화되는 것으로 모의되었다. 이는 장유하수처리장의 용량과 처리율이 현재의 상태로 유지되고, 하수의 유입량만 증가하는 계획하의 모의 결과이다.

5.2 향후 연구과제

이 연구에서는 제외되어 있으나 조만강유역의 인근에 있는 신어천유역에서 들어오는 하수의 양을 고려한 모의를 추가해야 한다. 향후 UIS로 구성된 신어천유역의 하수관망자료를 취득하여 입력자료를 수정할 것이다.

그리고 이 연구에서는 시간 흐름에 따른 하수량의 변화를 고려하지 못하였다. 만약 하수량의 시간에 따른 변화를 고려하여 모형의 입력자료로 사용한다면 보다 더 정밀한 건기 시 유량보정을 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2001). 서낙동강 하천정비기본계획 보고서.
- 경상남도 (2005). 조만강 하천정비기본계획 보고서.
- 김해시 (2007). 김해시 하수도정비 기본계획 변경 보고서.
- 서낙동강유역관계기관합동 (2005). 철새들의 낙원 서낙동강 수질개선 종합대책.
- 이상호, 이정민 (2006). “물 환경 건전화를 위한 도시하천의 물 순환 모의 (Ⅱ) -도림천 유역-.” 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제22권, 제5호, pp. 815-823.
- 이은주 (2006). SWMM을 이용한 도시 유역의 강우 유출특성과 비점오염 부하량 분석. 석사학위논문, 인제대학교.
- 이정민 (2007). 투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용. 박사학위논문, 부경대학교.
- 이종태, 강태호, 김정환 (1996). 제4회 수공학익습 교재: 도시유역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM모형. 한국수자원학회, pp. 97-204.
- 장주형 (2006). GIS기반의 SWMM 모형을 이용한 하수도시스템 선정에 따른 도시하천 수질개선효과의 정량적 분석. 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제22권, 제6호, pp. 982-990.
- 진락선 (2005). PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안. 석사학위논문, 서울대학교.
- 환경부 (2006). 전국수도종합계획.
- Arnold, J.G., Neitsch, S.L., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002). *Soil and water assessment tool - user's manual version 2000*. TWRI Report TR - 191. Texas Water Resources Institute, College Station, TX.

- Crawford, N.H. and Linsley, R.K. (1966). Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. *Tech. Report No.39*, Civil Engineering Department, Stanford University.
- Eagleson, E.D. (1970). *Dynamic hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Engman, E.T. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 112, No.1, pp. 39-53.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic model: comparison with multilevel expert calibration." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1992). *Storm water management model version 4: user's manual*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Kidd, C.H.R. (1978). *Rainfall-runoff processes over urban surfaces*. Proceedings International Workshop held at the Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, England.
- Medina, M.A. Jr. (1976). *Level III: receiving water quality modeling for urban stormwater management*. Environmental Protection Agency.
- Nix, S.J., and Heaney, J.P. (1988). Optimization of stormwater storage-release strategies. *Water Resources Research*, Vol 24, No. 11, pp. 1831-1838.
- Sartor, J.D. and Boyd, G.B. (1972). *Water pollution aspects of street surface contaminants*. Environmental Protection Agency.
- Shubinski, R.P. and Roesner, L.A. (1973). Linked process routing

models. Presented at Spring Meeting, American Geophysical Union.

Wang, Y. (1996). *Intergration of the U.S. Army Corps of Engineers' time-series data management system with continuous SWMM modeling*. Thesis, University of Guelph, Canada.

William, D.M.C. (2004). *Modeling water quantity and water quality with the SWMM continuous streamflow model under non-stationary land-use condition using GIS*. M.Sc. Thesis, University of Maryland, U.S.A.



감사의 글

드디어 제 대학원 생활의 마지막 결실을 얻는 시간입니다. 대학교 4년을 미혹한 상태로 졸업을 맞이하였던 때와는 사뭇 다른 느낌입니다. 이제는 사회로 진출하여 사회의 구성원으로 중요한 인재가 될 수 있다는 자신감을 다져봅니다.

먼저 오랜 시간 사랑으로 키워 주신 아버지, 어머니, 누님께 감사하고, 사랑한다는 말을 전합니다. 또한 하나뿐인 매형과 조카 이서연과 기쁨을 함께 하고자하며 항상 관심을 가져주시는 친가, 외가 어른들께 감사합니다.

대학원 2년의 생활은 저에게 많은 인연의 고리들을 엮여 주었습니다. 지도교수이신 이상호 교수님의 제자가 된 것이 그 첫 번째이자 가장 중요한 인연이라고 생각합니다. 부족한 저에게 보여주신 관심과 날카로운 지적의 말씀들은 저를 더욱 다듬는 좋은 계기였습니다. 앞으로 삶을 살아가면서 교수님께서 저에게 주셨던 가르침들을 잊지 않고 사회에 꼭 필요한 사람이 되겠습니다.

또한 바쁜 일정 속에서도 소중한 시간을 할애 하셔서 논문을 심사해주신 이영대 교수님, 이종섭 교수님께 깊이 감사드리며 항상 인자한 미소로 대해주시는 손인식 교수님께도 깊이 감사드립니다.

수자원 시스템 연구실의 일원이 된지 삼년이 훌쩍 넘었고 삼년동안 많은 경험들을 하였습니다. 그 많은 경험의 순간에는 항상 멋진 선배님들과 후배님이 함께 하였기에 지금의 제가 이 글을 써 내려가고 있다고 생각하며 항상 감사합니다. 먼저 토지공사의 에이스 이정민 박사님, 수자원공사의 핵 강신욱 선배님, 엔지니어링 업계의 대부 박종표 선배님, 수자원 시스템 연구실의 두뇌 강태욱 선배님, 이산의 희망 조희호 선배님, 엔지니어링 업계의 보석 최정민 선배님께 감사합니다. 또한 저와 함께 오랜

시간 생활하며 궂은일을 도맡아 해 주었던 최고의 후배 정태훈에게 감사함을 전하며 건승을 기원합니다.

때로는 답답한 대학원생활속에서 웃게 해주었던 대학원 동기 진중태, 김종식, 이찬우, 장효원, 이수호, 정원식, 김상우, 진민호, 조재민, 김창수, 최강석에게 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 연구실 생활에 대해 많은 조언을 해주신 백동일 박사님, 윤은찬 박사님께 감사합니다.

끝으로 이번 2009년에는 제 주위의 사람들이 행복하고 건강했으면 좋겠습니다. 저에게도 좋은 일만 있도록 기도해 주십시오. 감사합니다.

