

## SWMM 모형을 이용한 시화호 유역의 강우 유출 특성 분석에 관한 연구

### Analysis of Rainfall-Runoff Characteristics in Shihwa Industrial Watershed Using SWMM

이혜원 · 최정현\*<sup>†</sup>

Hye Won Lee · Jung Hyun Choi\*<sup>†</sup>

이화여자대학교 기후환경변화에측연구센터 · \*이화여자대학교 환경공학과

Center for Climate/Environment Change Prediction Research (CCCPR), Ewha Womans University

\*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(Received August 7, 2014; Revised October 16, 2014; Accepted January 5, 2015)

**Abstract :** In order to analyze the flow and pollutant runoff characteristics of industrial area, SWMM (Storm Water Management Model) was applied. The model was calibrated based on the measured data in the waterway of Sihwa industrial complex during six events, 2008-2009. The build-up process of pollutants is expressed as Power-linear form and washoff as Power-Exponential form. The validated model was used to analyze the change of the runoff characteristics in the industrial area. In the study area, runoff flow is decreased with an increase in impervious area, but there is no significant change in peak time. The results of this study will be used as basic information of impervious area reduction and watershed management in industrial areas.

**Key Words :** Storm Water Management Model (SWMM), Rainfall-Runoff, Industrial Complex, Parameter Estimation, Lake Shihwa

**요약 :** 산업단지의 유량 및 오염물질 유출 특성을 분석하기 위하여, SWMM 모형을 시화산업단지 1간선수로에 적용하여 분석하였다. 2008년과 2009년에 시화1간선수로에서 측정한 6회의 단일 강우 사상을 대상으로 유출량 및 SS, COD, TN 및 TP 부하량의 보정을 실시하였다. 대부분 불투수지역으로 구성되어 있는 시화1간선수로 유역의 오염물질의 축적 과정은 지수 형태로 이루어진 후 강우에 유출되는 Power-linear을, 쓸림은 토지이용에 따라서 도시지역은 초기 세척을 잘 묘사할 수 있는 Power-Exponential이 적합한 것으로 판단된다. 검증된 SWMM 모형을 활용하여 불투수면적의 변화가 산업단지 내 유출량 및 첨두시간 변화에 미치는 영향 분석하였다. 본 연구지역에서는 불투수면적 증가에 따라 유출량의 감소는 보였으나, 첨두시간에는 유의한 변화를 보이지 않았다. 본 연구 결과는 산업단지의 불투수면 저감방안 수립 및 유역 관리를 위한 기초정보로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어 :** SWMM, 강우 유출, 산업단지, 매개변수 산정, 시화호

## 1. 서론

우리나라는 1970년 이후 급속한 도시화와 산업화로 인하여 농지, 산림, 하천부지 등의 투수면적은 감소하는 반면 건물, 아스팔트 도로, 주차장 등의 불투수 면적은 증가하는 등의 토지 이용 패턴이 변화하고 있다. 또한 도시 우수 및 우수를 처리하기 위한 복잡한 하수관로의 구축은 강우의 토양 침투량을 감소시키고, 표면 유출을 증가시킨다. 이로 인하여 도심지에서 집중 호우에 따른 재해가 잇따라 일어나고, 불투수율의 증가에 따른 강우도달시간의 감소, 첨두 유량의 증가 등으로 인하여 저지대의 하수관거 병목지점에서 우수가 배제되지 못한다. 뿐만 아니라 표면 침투량의 감소는 지하수 수위의 저하 및 토양의 자연정화 능력의 감소를 발생시켜 하천의 건천화 현상과 초기 강우시 도시 비점오염 원 문제를 발생시킨다.<sup>1-5)</sup>

우리나라의 수도권에 위치한 산업단지는 수도권에 인구와 산업이 과밀하게 집중되는 것을 막고 수도권 내의 부적격 공장에 대한 이전을 촉진, 수용하기 위하여 조성되었다. 따라서 이들 산업단지에는 산업 효율을 강조하여 녹지 조성 및 수질관리 시설 등이 미흡하고 도로 옆 일부 수목 등을

제외하고 대부분 불투수층으로 구성되어 있다. 특히 우리나라의 대표적인 산업단지인 시화호 유역에 위치한 시화공단과 반월공단은 간헐적으로 미처리된 폐수가 간선수로 및 토구를 통해 시화호로 유입되는 것으로 조사되고 있다. 시화공단 내 간선수로는 향후 하천복원사업을 통해 친환경적 하천으로 조성할 계획을 하고 있다. 하천복원사업을 성공적으로 달성하기 위해서 가장 기본적으로 해결해야 할 것은 하천의 유지수량 확보와 더불어 하천의 수질을 만족시켜야 하지만 현재 간선수로의 수질은 친환경적 하천조성에 적합한 수질을 만족하고 있지 못하고 있다. 그러므로 하천복원사업의 원활한 추진을 위해서는 간선수로의 수질을 오염시키는 원인을 파악하고 수질개선을 위한 연구 및 지속적인 단속 등 다양한 유역환경개선대책 방안 마련이 필요하다.<sup>6)</sup>

도심지역 면적의 증가에 따른 유출량의 변화에 관한 연구는 유역 모델과의 연계를 토대로 지속적으로 진행되고 있다. 일반적으로 유역 모델의 사용은 유역에서 유출되는 비점오염 부하량과 유역 내 수량 예측을 목적으로 하며, 이를 통하여 유역 내 지표나 하천에서의 오염 물질 유출과 그 이동 과정을 시간적 및 공간적으로 분석한다. 현재 다양한 유역 모델이 도시, 비도시 및 농업 지역 등의 적용대상과 모델의

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: jchoi@ewha.ac.kr Tel: 02-3277-6686 Fax: 02-3277-3275

특성과 한계 등을 고려하여 개발되고 있으며, SWMM (Storm Water Management Model)은 도시 지역의 유출 유량과 수질을 예측하기에 적당한 모델로 개발 및 사용되고 있다.<sup>7-12)</sup>

최근 들어, 유역 모델을 적용하여 도시화에 따른 유출량의 변화 연구가 다양하게 진행되고 있다. 도시지역 면적의 증가에 따른 삼림 면적 감소 등으로 인한 유출량 변화에 대한 연구와 도시지역에 SWMM 모형을 적용하여 도시의 강우-유출 현상을 효과적으로 모의할 때 요구되는 도수우수 배수공간의 정밀도와 지하의 관거망 공간정보 정밀도의 수준을 파악하는 연구 등이 있다.<sup>13-15)</sup> 또한 SWMM을 이용하여 농촌에서 도시로 토지 이용이 변화된 지역에 대해 개발 전후의 유출특성을 평가한 연구 및 SWAT 모형을 이용하여 도시지역 면적의 증가에 따른 농경지 면적의 감소로 인한 유출량 변화에 대한 연구가 수행된 바 있다.<sup>16,17)</sup> Campbell과 Sullivan<sup>18)</sup>는 미국 Alabama 주에서 동굴의 유량 변화를 예측하는데 사용하였고, 캐나다에서 Duchesne<sup>19)</sup>는 합류식 관거를 실시간 관리하기 위하여 적용하였다. Hsu<sup>20)</sup>는 SWMM의 RUNOFF와 EXTRAN 블록을 연결하여 타이페이의 범람을 예측하는데 사용하였다. Temprano<sup>21)</sup>는 스페인의 Santander 지역의 하수관망 시스템의 유출량 및 오염부하량을 SWMM 모형을 이용하여 추정하였다. 특히 유량 관련 매개변수 11개와 수질 관련 매개변수 5개 대하여 보정을 통하여 대상지역의 적절한 매개변수 값을 제안하였으며, 강우량과 오염부하량의 상관관계를 분석하였다.

본 연구에서는 대표적인 산업단지인 시화산업단지 1간선수로에서 강우 유출량과 오염물질 유입특성 조사를 기반으로, SWMM 모형을 적용하여 산업단지의 유출량 및 오염물질 유입과 관련된 매개변수를 산정하였다. 또한 불투수면적의 변화가 산업단지 내 유출량 변화에 미치는 영향을 분석함으로 향후 간선수로 수질개선 및 산업단지의 친환경개발 시 근거 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구대상지

시화산업단지는 행정구역상 시흥시와 안산시 관할 하에 있으며, 배후거주단지에서 발원하여 4개의 간선수로가 우수 배제를 목적으로 위치하고 있다. 시화산업단지 간선수로 상류지역은 유역 특성상 아파트단지가 밀집되어 있는 도시유역 특성을 보이고 있어 간선수로 우수토구를 통해 우수와 도시하수가 혼합되어 간선수로로 유입되어 하류지역으로 흐르고 있다. 중류 지역은 상가가 밀집 형성되어 있는 상가 유역 특성을 보이고 있고, 하류지역은 주변 유역이 공장으로 형성되어 있는 산업단지유역 특성을 갖고 있어 미처리된 고농도 공장폐수가 간헐적으로 우수토구를 통해 간선수로로 유입되고 있다. 시화산업단지 간선수로는 제방 쪽에 산재해있는 우수토구를 통해 산업단지로부터 불법적으로 미처리된 폐수가 유입되고, 강우시 산업단지 주변에 적재되



Fig. 1. Geographical location of study area (white line) and sampling sites (▲).

어있는 폐기물 유입, 관로 오점에 따른 공단폐수 유입 등을 통해 고농도의 오염물질이 유입되어 간선수로의 수질악화가 심각하여 시화호 수질오염의 주요 원인 중에 하나로 사회적으로 인식되어져 왔다.<sup>6)</sup>

본 연구대상지역인 시화산업단지 1간선수로는 현재 하류 지점에서 차집펌프 운영 중에 있어 평상시에는 간선수로로 유입되는 공장폐수 및 오염물질이 전량 차집되어 시화하수 종말처리시설로 이송되어 처리되고 있다. 따라서 비강우시에는 오염물질이 시화호로 유입되지 않고 있는 상황이다. 하지만 강우시에는 차집펌프 용량부족 및 유역 특성상 불투수면적이 높아 표면유출이 높은 유역 특성을 갖고 있어 유역으로부터 유입되는 유량이 급속히 증가되어 미처리된 오·폐수가 전량 차집되지 못하고 하류 보를 월류하여 시화호로 유입되고 있다(Fig. 1).

### 2.2. 모델 적용 및 구성

SWMM은 U. S. EPA에서 1971년에 완성한 도시 유역의 하천유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발된 모델로 강우 사상에 의해 발생하는 유출수량과 배수관망에서의 유출량 추정, 저류량 산정, 오염물질의 처리 등을 모의할 수 있다. 단일 강우현상 및 연속 모의가 가능한 장점을 가지고 있으며, 최소의 보정으로 비교적 정확한 유출량을 산정할 수 있고 다양한 오염물질 모의 방법들을 적용할 수 있어 세계적으로 널리 사용되고 있는 유역 모델이다. SWMM은 Block의 형태로 구성되며, 전체적으로 5개의 Service Block(보조블록)과 4개의 Computational Block(실행 블록), 하나의 Executive Block으로 형성되어 있다. 실행블록은 유출과 관련된 RUNOFF Block, 하도 내 수질을 모의하는 TRANSPORT Block, 하도의 수리 수문 기작을 정밀하게 표현할 수 있는 EXTENDED TRANSPORT (EXTRAN) Block, 처리시설 기

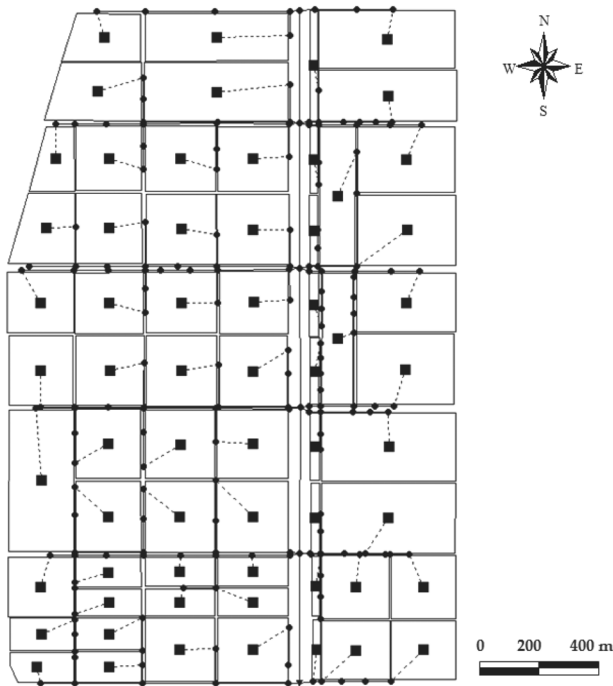


Fig. 2. Layout of flow network and subcatchments for SWMM.

작을 반영할 수 있는 STORAGE와 TREATMENT Block으로 구성되어 있다.<sup>22)</sup>

소유역 구분과 소유역별 면적, 하천 길이, 경사도 등의 지형적인 요소를 추출하기 위하여 환경부에서 제공하는 30 m × 30 m DEM을 기초로 이용하였다. 토지 이용 형태와 토양 특성은 기존 구축되어 있는 토지이용도와 토양도 자료를 GIS도구를 이용하여 분석하였다. 토지 이용 형태는 시가지지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지 및 수역 7가지로 대부분을 하였으며, 시가지지역은 다시 주거, 공업, 상업, 교통 및 공공시설지역 등으로 구분하였다. 이 자료를 기초로 소유역별 불투수 지역 비율을 산정하였다.

대상 유역에 대하여 하수도 대장 평면도 자료를 기반으로 간선관거를 분리하여 관망을 구성하였다. 구성된 관망으로부터 간선관거의 합류점 및 크기가 큰 맨홀을 기준으로 유출량 산정 지점을 선정하였다. 유역 내 지형과 각 지역의 인위적인 배수계통에 따라 전체 대상유역을 63개의 소유역으로 분할하였으며, junction node 180개, conduit 179개로 구성하였다(Fig. 2).

기존에 수행된 SWMM의 민감도 분석에 관한 연구를 살펴보면, 유출량에 사용되는 계수는 불투수지형의 조도(Manning) 계수, 투수지형의 조도 계수, 지면저류량(depression storage), 침투감소계수, 유역 폭 등으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 지형도를 바탕으로 각 분할된 소유역의 유역면적, 유역 폭, 유역 평균 경사, 불투수율 등의 매개변수를 산정하였다. 특히 유역의 배수 특성을 나타내는 조도계수는 불투수지역과 투수지역의 특성을 반영하였으며, 유출 수량의 보정은 민감도 분석을 바탕으로 투수지역 저류량, 최대와 최소 침투 계수, 침투 감소 계수를 이용하였다.<sup>23-25)</sup> SWMM

에서 침투량은 Horton 방정식이나 Green-Ampt 방정식 중에서 선택할 수 있으나, 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 Horton 방정식을 사용하였다. Horton 방정식의 침투인자에 대한 계수들은 Warwick<sup>23)</sup> 등에서 사용된 값을 참고로 하여, 최대 침투율 50.8 mm/hr, 최소 침투율은 3.0 mm/hr, 최대 침투 감소 계수는 0.00115 sec<sup>-1</sup>을 사용하여 매개변수를 산정하였다. 강우 시작 전에 측정된 기저유량과 수질농도를 이용하여 점오염원 부하량을 계산하였다(Table 1).

2008년 5월 18일, 6월 17일, 7월 16일, 7월 19일부터 21일까지의 강우 사상과 2009년 6월 20일과 8월 11일에 발생한 6차례 단일강우 사상을 대상으로 해당 유역의 유출수 유량을 모의하였으며, 동일한 시기에 실측된 자료를 이용하여 모형 보정을 실시하였다. 강우발생 기간 동안 측정된 유량 값이 강우발생 전에 측정된 기저유량을 고려하여 유출수량을 보정하였다(Table 2).

강우시 수질은 SS (Suspended Solids), COD (Chemical Oxygen Demand), TN (Total Nitrogen) 및 TP (Total Phosphorus) 항목에 대하여 모의하였으며, 그 결과를 부하량으로 분석 및 비교하였다. 오염물질의 축적 과정은 지수 형태로 이루어진 후 강우에 유출되는 Power-linear을, 쓸림은 토지이용에 따라서 도시지역은 초기 세척을 잘 묘사할 수 있는 Power-Exponential, 논, 밭, 산지 지역은 Rating Curve Method 적용이 일반적이다. 본 연구지역은 불투수 비율이 대부분을 차지하는 산업단지 Power-Exponential을 적용하였다. 수계로 구분된 토지이용에서는 유출이 일어나지 않을 것으로 가정

Table 1. Parameter used for the calibration of the model

Parameters	Value	Range
Subcatchment Manning's n		
- Impervious area (Concrete or asphalt)	0,010	0,01-0,013
- Pervious area (Grass)	0,16	0,15-0,41
Conduit Manning's n		
- Closed conduits (Concrete)	0,015	0,012-0,017
- Open conduits (Natural)	0,035	0,030-0,100
Depression storage (mm)		
- Impervious area	1,78	1,27-2,54
- Pervious area	5,08	2,54-7,62
Infiltration (Horton Method)		
- Maximum infiltration rate (mm/hr)	50,8	
- Minimum infiltration rate (mm/hr)	3,0	47,3-308,7
- Maximum infiltration deduction coefficient (sec <sup>-1</sup> )	0,00115	0,245-116,13

Table 2. Rainfall event used in calibration and verification

Start time	End time	Rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)
2008-05-18 14:10	2008-05-18 23:20	42,5	9,17	4,63
2008-06-17 05:54	2008-06-17 16:40	22,6	10,77	2,10
2008-07-16 13:24	2008-07-16 22:54	33,5	9,5	3,53
2008-07-19 06:30	2008-07-21 14:30	280,0	56	5,00
2009-06-20 14:49	2009-06-20 23:19	45,5	8,5	5,35
2009-08-11 12:32	2009-08-11 22:02	86	9,5	9,05

**Table 3.** Calibration and verification coefficient in Buildup and Washoff function of pollutants

Parameter	Buildup function			Washoff function	
	Max. buildup [kg/m <sup>2</sup> ]	Rate constant [1/day]	Time exponent	Washoff coefficient	Washoff exponent
SS	2.5	2.5	2.5	50	0.5
COD	1.5	2.5	2.5	1.2	0.5
TN	0.8	0.5	0.5	0.2	0.5
TP	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5

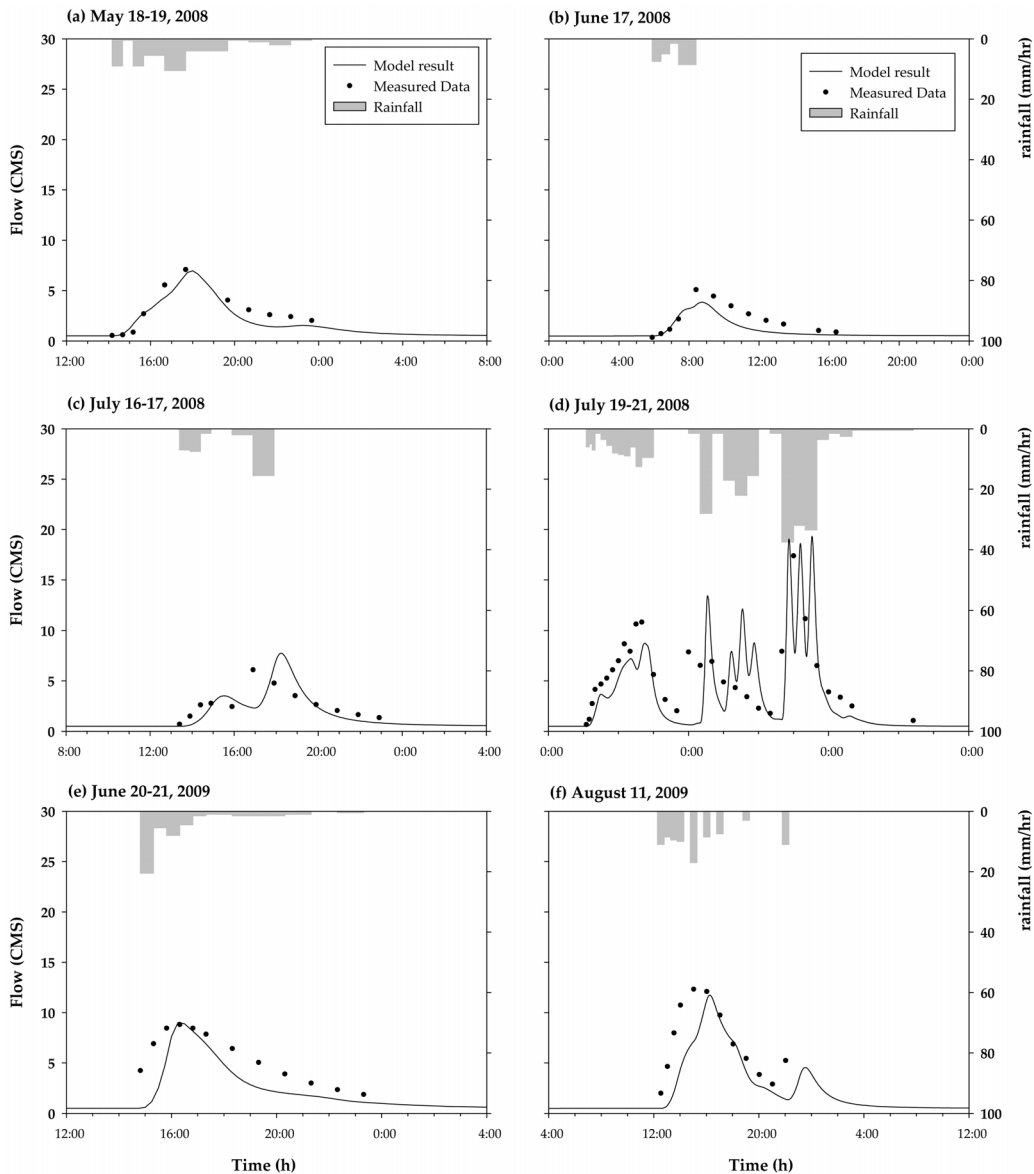
하였다. 강우 시작 전에 측정하여 앞서 고려된 기저유량과 그 당시 수질농도를 이용하여 점오염원 부하량을 계산하였다. 강우시 측정된 유량과 수질농도를 곱하여 전체 부하량을 산정하였으며, 여기서 점오염원의 부하량을 제외한 값을 비점오염 배출 부하량으로 계산하여 보정에 사용하였다(Table 3).

### 3. 연구 결과 및 고찰

#### 3.1. 시화산업단지

시화산업단지 1간선수로 유역의 유출수량에 대하여 6회 강우사상을 대상으로 모델의 보정을 실시하였다. 6회 강우 사상 중 총 강우량 50 mm 이하는 4회이며, 그 외 각각 86 mm 과 280 mm의 집중 강우 현상을 포함한다. 대상 강우 사상은 강우강도 2.10-9.05 mm/hr의 특징을 가지고 있다. 강우 발생 직전에 측정된 유량을 기저유량으로 보고 모델의 유출수 유량 결과에 기저유량을 더하여 측정된 하천의 유량을 보정하였다.

Fig. 3에 실측한 유량에 대하여 모델 예측값을 비교하여 제시하였다. 보정 결과, 전반적인 경향을 잘 모의하고 있으며 특히 유출유량의 시간적 변화 경향과 첨두 유량이 나타나는 시간도 비교적 일치하였다. 그러나 일부 유량이 평가



**Fig. 3.** Calibration results of flow data for six events.

질하되는 경향이 있으며, 이는 지하 수리 구조물이나 유출 흐름에 대한 자료 부족으로 유역 모델을 지표수만을 대상으로 적용하였기 때문에 오차가 발생한 것으로 판단된다. SWMM 모델에서 오차는 유출 모델에서 모든 강우 사상에 대하여 강우 개시 이전의 건기일수에 대한 고려, 유역을 실제 유역과 달리 직사각형 형태로 가정하여 모의한 공간적 개념의 오차, 투수지역과 불투수 지역 간의 관계 처리, free parameter 조정에 대한 제약 등에서 기인할 수 있다.<sup>23)</sup> 또한 유량 계산에 적용되는 Manning 식에서 수로는 uniform 형태를 가정하므로 굴곡, 수로의 확장 및 축소, 그 외 다른 구조물에 의한 유량 증가를 정확하게 예측하지 못해 유량이 손실되는 경향이 있다.<sup>18)</sup>

모의한 SS, COD, TN 및 TP 부하량에 관한 결과를 Fig. 4~6에 제시하였으며, 실측치와 예측 결과가 적절히 일치하였다. 유출 수질 모의는 앞서 모델 원리에서 제시한 바와 같이, 크게 오염물질의 축적과 세정 과정으로 구분된다. 오염

물질의 축적에서는 오염물질은 최대 축적치에 이르기 전까지 시간에 따라 오염물질이 선형적으로 증가하는 특성을 나타내는 Power function을 적용하였다. 각 모의 항목의 특성에 따라서 오염물질의 최대 가능 축적량, 오염물질 축적 속도 상수 및 시간 지수에 대하여 보정을 하였으며 그 결과는 Table 3에 제시하였다. 오염물질의 세정 과정은 강우 사상의 개시와 함께 진행되며, 본 연구에서는 도시 지역의 초기 세척을 잘 묘사할 수 있는 Exponential 방법을 선정하였다. 또한 오염원 유출 보정에 정확성을 기하기 위하여 시화 산업단지 1간선수로 유역의 토지이용 현황과 시가화의 특성을 분석하여, 전체 유역의 면적 중 90% 이상을 불투수 면적으로 적용하였다.

오염물질의 축적 과정의 특성을 분석한 결과, SS와 COD는 최대 가능 축적량의 차이를 제외하고는 오염물질 축적 속도 상수와 시간 지수가 동일하며 TN과 TP가 동일한 양상을 보이고 있다. 이것은 오염물질의 특성과도 일치하는

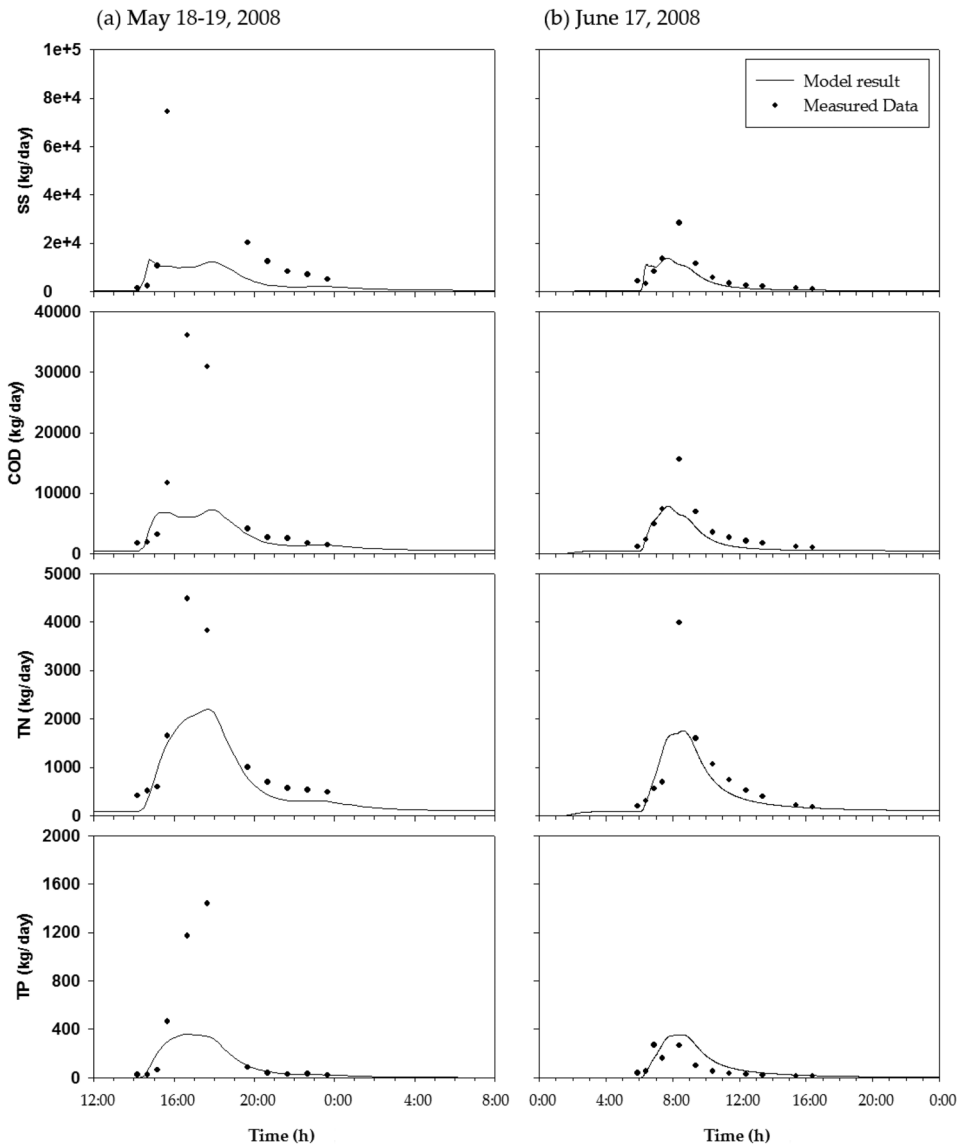


Fig. 4. Calibration results of water quality (May 18-19 and June 17, 2008).

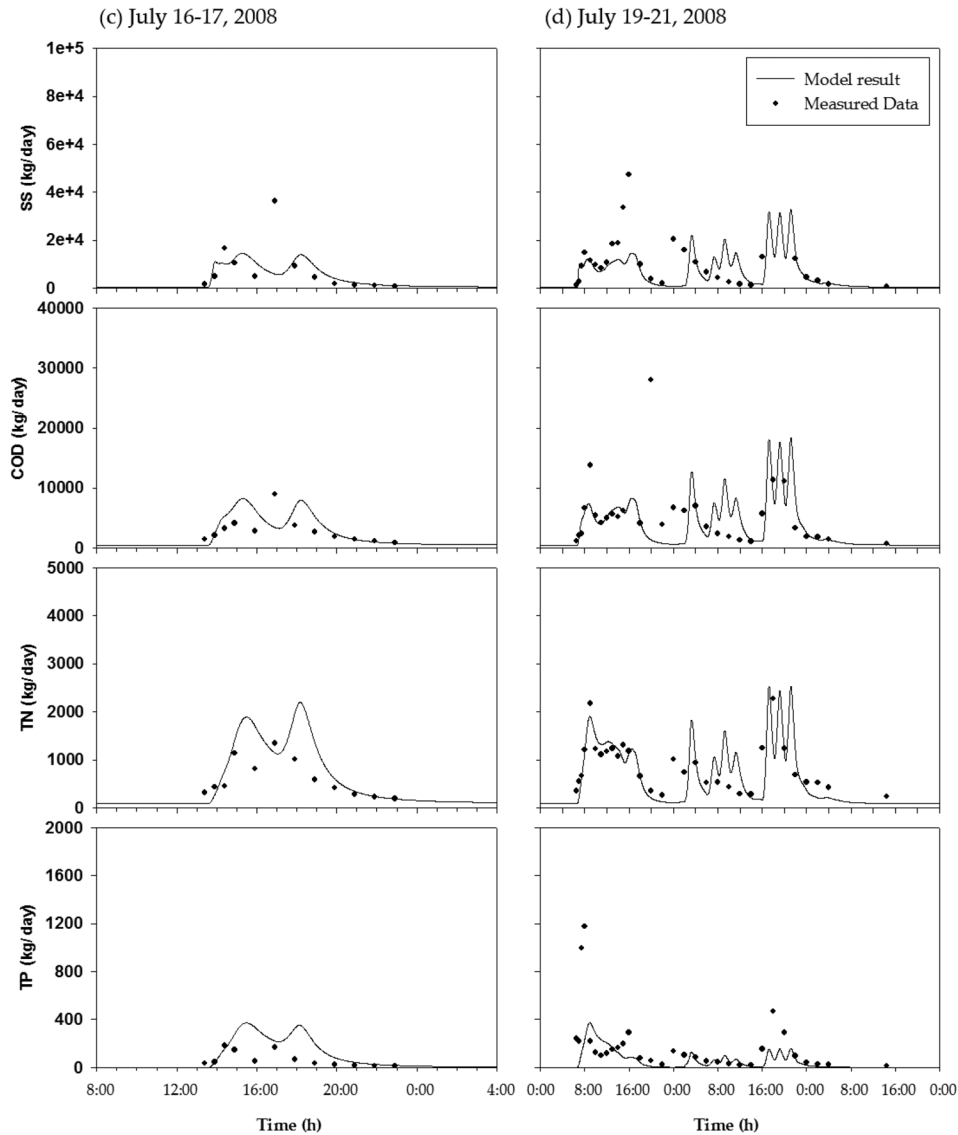


Fig. 5. Calibration results of water quality (July 16-17 and 19-21, 2008).

내용으로 SS와 COD는 강우 개시 이전의 건기일수에 비교적 영향을 많이 받으며 산업단지의 먼지 및 보존성 물질 배출과도 관련이 있는 것으로 판단된다.<sup>26)</sup>

오염물질의 세척 과정의 특성을 분석한 결과, 도시 지역은 농촌 지역의 비로 및 축산 분뇨 등에 비하여 오염물질이 건기 동안 축적된 양과 유역 내의 강우 기간 동안의 전체 유출량보다는 유출률과의 관계로 해석할 수 있다. 본 연구 대상지역의 오염물질 세척 과정에서 SS, COD, TN 및 TP는 동일한 세척 지수가 산정되었으며, 각 물질에 따라 고유한 세척 계수를 산정할 수 있었다.

대부분의 항목에서 침투유량이 나타나는 시점에서 평가 절하되고 있음을 알 수 있다. 이것을 유출수량 보정에서 나타났듯이 실제 측정치보다 예측 유량이 낮게 평가되어 그에 따라 오염물질 부하도 낮게 예측된 것이라 판단된다. 그러나 전체적으로 경향성은 일치하며 시화산업단지 1간선수로 유역에서 나타나는 현상에 대하여 모델이 적절히 예측

하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히, COD의 경우는 모델 보정시 침투 유량이 나타나는 시점에서 평가 절하가 되는 현상이 크게 나타난다. 이것은 실측 자료의 기저 유량 및 오염물질 농도를 분석한 결과, 강수시에 비강수시보다 낮은 농도의 유입수가 유입되어 강수 시작 후 유량 증가에 따른 희석 효과로 급격하게 낮아지는 유입 특성으로 해석될 수 있다.

### 3.2. 불투수율 변화에 따른 유출특성 변화 분석

현재 시화공단 유역의 소유역 불투수면적 비율은 90% 이상을 차지하고 있다. 불투수면적 비율을 70%, 50%, 30% 및 10%로 감소시키면서 유출량 변화를 비교하여 보았다. 2008년 5월 18일 강우사상에서 불투수면적이 90%에서 50%로 감소함에 따라 유역의 최종 유출구에서의 침투유량은 6.99 CMS에서 4.21 CMS로 약 40% 감소함을 확인할 수 있었다. 불투수면적의 비율 감소에 따른 침투유량의 변화량은 Table 4

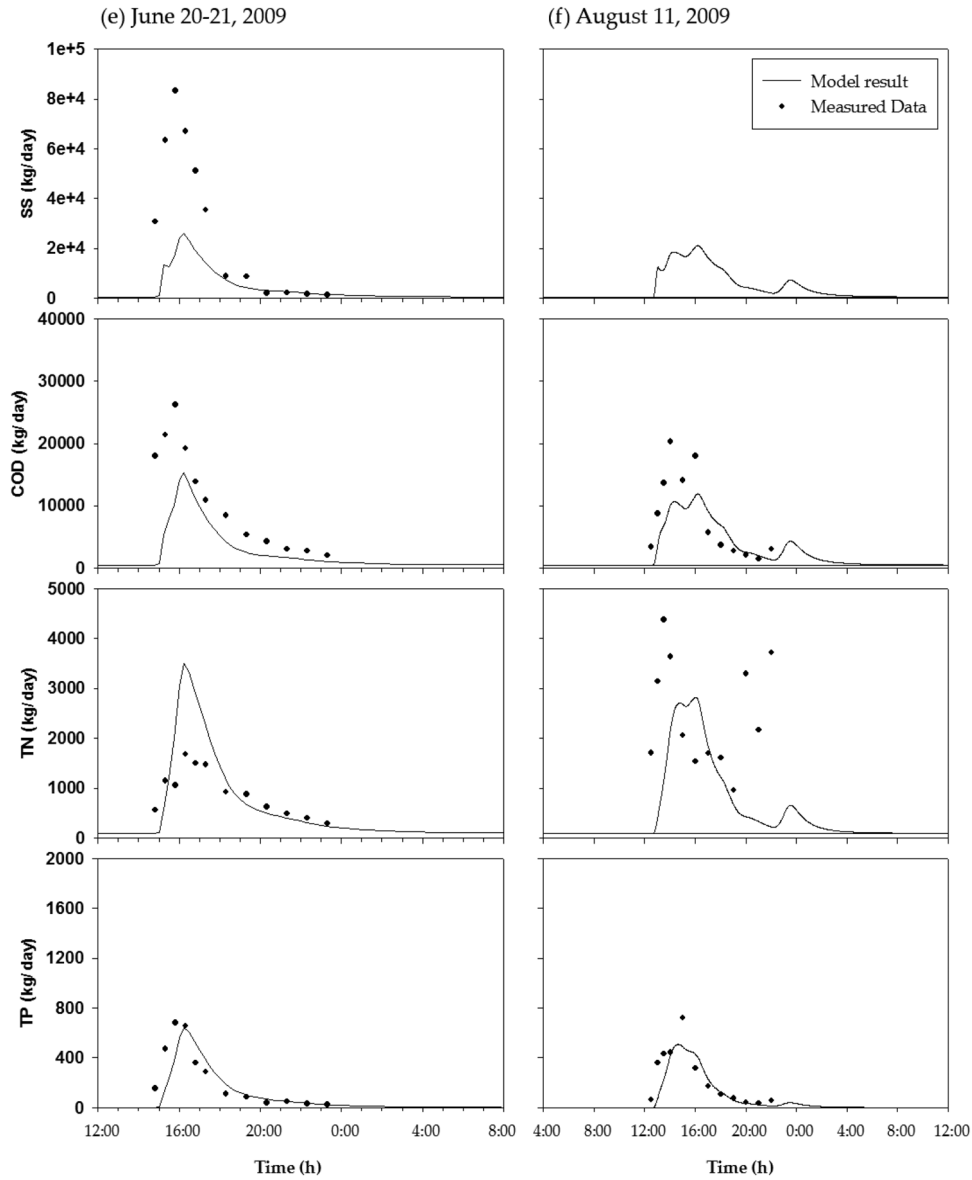


Fig. 6. Calibration results of water quality (June 20-21 and August 11, 2009).

Table 4. Comparison of runoff with impervious area change

Impervious area decrease	90% (present)	70%	50%	30%	10%
Peak runoff (CMS)	6.99	5.63	4.21	2.72	1.22
Decrease ratio (%)	-	19.5	39.8	61.1	82.6

에 나타내었다. 침투유량의 변화량과 불투수면적의 감소의 관계는  $R^2$ 가 0.999로 선형적으로 상관관계가 높았으며, 이는 향후 공단지역의 유역관리시 불투수면적의 감소에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 7에 제시한 불투수면적의 감소에 따른 유출량 변화 결과를 살펴보면, 강우 사상이 발생하였을 때 하천에서의 침투유량 도달 시간은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 본 연구 대상지역인 시화1공단 지역의 유역면적이 적어서 기존 연구에서 나타나는 침투유량 도달 시간의 영향을 보이지 않는 것으로 판단된다.<sup>27)</sup>

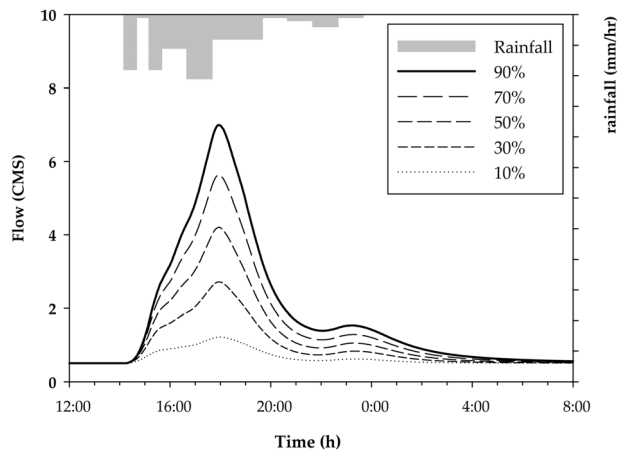


Fig. 7. Variations of runoff hydrograph according to the increase of impervious area in Shiwha watershed during the flood event of May 18-19, 2008.

## 4. 결론

본 연구에서는 우리나라 대표적인 산업단지인 시화산업단지 1간선수로에서 강우 유출량과 오염물질 유입특성 조사를 기반으로, SWMM 모형을 적용하여 산업단지의 유량 및 오염물질 유출 특성을 분석하였다. 해당 연구대상지역의 강우시 유출수 유량과 오염부하량 산정을 위하여 SWMM 모형의 Rain Block과 Runoff Block을 이용하였다. 해당 유역 특성을 반영하기 위한 지형자료 추출을 위하여 하수관망 자료 및 DEM을 분석하여 유역을 구분하였으며 면적과 경사도 등 유역에 대한 정보를 추출하였다. 2008년과 2009년에 시화1간선수로에서 측정된 6회의 단일 강우 사상을 대상으로 유출량 보정을 실시하였다. 또한 SS, COD, TN 및 TP 부하량에 대하여 보정을 통하여 산업단지에 적합한 오염물질 축적과 세정 함수를 선정하고 시화1간선수로의 오염물질 축적 및 세정 계수를 산정하였다. 대부분 불투수지역으로 구성되어 있는 시화1간선수로 유역의 오염물질의 축적 과정은 지수 형태로 이루어진 후 강우에 유출되는 Power-linear을, 쓸림은 토지이용에 따라서 도시지역은 초기 세척을 잘 묘사할 수 있는 Power-Exponential이 적합한 것으로 판단된다. 각각의 오염물질 이동 모의를 통하여 본 연구대상지역의 특성을 반영한 계수들을 산정하였다. 또한 검증된 모형을 기반으로 불투수면적의 변화가 산업단지 내 유출량 및 침투시간 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구대상지의 불투수면적의 증가는 유출량 감소와 선형적 관계를 가지고 있으나, 대상유역의 면적이 작고 최종 유출지점까지의 거리가 짧아 침투시간의 변화에는 유의한 차이를 보이지 않았다.

본 연구의 결과는 산업단지의 불투수면 관리를 위한 기초정보를 제공하며, 불투수면 지표 모델 연구를 통하여 불투수면 저감방안 수립 및 유역 관리 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

## Acknowledgement

이 논문은 2014년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2009-0083527)입니다. 또한 한국수자원공사 “시화호 유역 수질오염원 전수조사(2007-2009)” 연구과제의 자료를 활용하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

## References

1. Lee, J. G. and Heaney, J. P., “Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems,” *J. Water Res. PL.-ASCE.*, September/October, pp. 419~26(2003).
2. Pappas, E. A., Smith, D. R., Huang, C., Shuster, W. D. and Bonta, J. V., “Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation,” *Catena*, **72**, 146~52(2007).
3. Farahmand, T., Sean, W. F. and Quilty, E. J., “Detection and visualization of storm hydrograph changes under urbanization: An impulse response approach,” *J. Environ. Manage.*, **85**, 93~100(2007).
4. Lee, B. H., “Research of Runoff Management in Urban Area using Genetic Algorithm,” *J. Korean Geophysical Soc.*, **9**(4), 321~331(2006).
5. Park, J. K. and Park, Y. G., “A Study on the change of the runoff characteristics according to urbanization,” *J. Korean Soc. Environ. Administration*, **14**(1), 9~16(2008).
6. Rahmat, S. N., Yusop, Z. and Abustan, I., “Modeling of stormwater quality from residential catchment using storm water management model (SWMM),” National Conference-Water for sustainable developed towards a developed nation by 2020, Malaysia, pp. 1~8(2006).
7. Kim, S. W., Choi, K. S., Kim, D. S. and Lee, M. K., “Characteristics of Non-point Source Pollutants Runoff from Agricultural and Industrial Areas in Lake Sihwa Watershed,” *J. Korean Soc. Water Qual.*, **25**(5), 768~777(2009).
8. Jang, S., Cho, M., Yoon, J., Yoon, Y., Kim, S., Kim, G., Kim, L. and Aksoy, H., “Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment,” *Desalination*, **212**, 344~356(2007).
9. Seo, D. I. and Fang, T., “Application of Automatic Stormwater Monitoring System and SWMM Model for Estimation of Urban Pollutant Loading During Storm Events,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(6), 373~381(2012).
10. Han, Y. H. and Seo, D. I., “Application of LID Methods for Sustainable Management of Small Urban Stream Using SWMM,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 691~697(2014).
11. Park, Y. H. and Park, S. S., “Development of Non-point Source Pollution Loading Function Based on Rainfall Intensity and Land Use Type,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **26**(10), 768~777(2009).
12. Yi, H. S. and Park, S. S., “A water Quality Modeling Study of Chunggye Stream during Combined Sewer Overflow Period,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(12), 768~777(2009).
13. Park, M. J., Kwon, H. J. and Kim, S. J., “Analysis of Impacts of Land Cover Change on Runoff Using HSPF Model,” *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **38**(6), 495~504(2005).
14. Lee, S. J., Kim, Y. O., Lee, S. H. and Lee, K. S., “Water Cycle Simulation for the Dorimcheon Catchment Using WEP Model,” *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **38**(6), 449~460(2005).
15. Park, S. Y., Lee, K. W., Park, I. H. and Ha, S. R., “Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation,” *Desalination*, **226**, 328~337(2008).
16. Park, J. H., Yoo, Y. G., Park, Y. K., Yoon, H. T., Kim, J. G., Park, Y. S., Jeon, J. H. and Lim, K. J., “Analysis of Runoff Reduction with LID Adoption using the SWMM,” *J. Korean Soc. Water Qual.*, **24**(6), 806~816(2008).
17. Kim, J. K., Son, K. H., Noh, J. W., Jang, C. L. and Ko, I.



- H., "Evaluation of Urbanization Effect and Analysis of Hydrological Characteristics in the Gap River Catchment using SWAT," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **39**(10), 881~901(2006).
18. Campbell, W. C. and Sullivan, S. M., "Simulating time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model," *Eng. Geol.*, **65**, 133~139(2002).
19. Duchesne, S., Mailhot, A., Dequidt, E. and Villeneuve, J. P., "Mathematical modeling of sewers under surcharge for real time control of combined sewer overflows," *Urban Water*, **3**, 241~252(2001).
20. Hsu, M. H., Chen, S. H. and Chang, T. J., "Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system," *J. Hydrol.*, **234**, 21~37(2000).
21. Temprano, J., Arango, Ó. Cagiao, J. Suárez, J. and Tejero, I., "Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain," *Water SA*, **32**(1), 55~63(2006).
22. Rossman, L. A., "Storm Water Management Model, Ver. 5.0," User's Manual, U. S. EPA(2004).
23. Warwick, J. J. and Tadepalli, P., "Efficacy of SWMM Application," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **117**(3), 352~366(1991).
24. Kang, Y. S. and Park, S. S., "A Study on the Intergation of Watershed and Stream Models for Impact Assessment of Urban Development on Water Environment," *J. Environ. Impact Assess.*, **13**(4), 153~164(2004).
25. Huber, W. C. and Dickinson, R. E., "Storm Water Management Model, Ver. 4 User's Manual," EPA(1988).
26. Lee, H. W., Choi, N. H., Lee, Y. S. and Choi, J. H., "Estimation of Pollutants Loading from Non-Point Sources Based on Rainfall Event and Land use Characteristics," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(8), 572~577(2011).
27. Lee, H. W., "A study on Watershed Model for Predicting the Runoff Characteristics of Urban Area," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(2), 1089~1094(2009).