

강우 초기특성에 따른 비점오염부하량 산정을 위한 FFC2Q 모형

FFC2Q Model for NPS Load Analysis according to Characteristics of Early Stage of Runoff

이 종 태* / 서 경 아** / 허 성 철***

Lee, Jong-Tae / Seo, Kyung-A / Hur, Sung-Chul

Abstract

We study the basic theory and applicability of the WQUAL block in the FFC2Q model and the characteristics of non-point pollutant loads during the early stage of runoff. Study is also performed on selection of the values of the related parameters and their effect on the simulation results. FFC2Q simulation results are compared for verification with the measured data for three rainfall events in the Gunja Subbasin and found to be similar to the measured data in peak-flows, total runoff volumes, total loads, peak concentrations and times of peak concentration. This model thus shows results very close to those applying the SWMM and MOUSE models, even though it uses simplified input data. Related to rainfall distribution, under the condition of Huff 1st quartile distribution the pollutant loads occurred earlier than under other conditions, and in the early stage of rainfall the BOD and COD loads increased faster than the SS loads. The NPS loads were concentrated in the early stage of rainfall and finally reached total loads, so the rainfall after that could not contribute so much to the NPS loads.

Keywords : Urban Drainage, CSOs, NPS, FFC2Q (WQUAL), SWMM, MOUSE

요 지

이 연구에서는 FFC2Q모형의 WQUAL블럭의 기본이론과 적용성을 검토하고, 도시지역의 강우초기 시 집중적으로 발생하는 CSOs의 비점오염부하 특성을 분석하였다. 또한 비점오염물 축적량 산정법과 쓸림방정식에서 주요 매개변수들의 선택과 그 영향을 분석하였다. 군자 배수구역의 3개 강우사상에 대한 실측치와의 비교를 통해 침투유출량, 총유출량, 총부하량, 침투농도 발생시간 등을 적정하게 모의할 수 있었으며, 입력자료의 단순화에도 불구하고 SWMM, MOUSE 등과 대등한 계산 결과를 보였다. 강우분포와 관련하여서는, 초기에 집중도가 높은 Huff1 분포에서 오염부하가 다른 분포에 비해 빠르게 발생하였으며, 강우초기 BOD₅, COD의 부하량 증가율은 SS에 비해 크게 나타났다. 비점오염부하량은 일정 강우 초기에 집중되어 결국 총부하량에 이르며, 이후 강우지속에 따른 유출은 비점오염부하량에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 도시구역, CSOs, 비점오염부하량, FFC2Q (WQUAL), SWMM, MOUSE

* 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수

Corresponding Author, School of Civil Engineering, College of Engineering, Kyonggi University, Seoul 120-702, Korea.
(e-mail : jtlee@kyonggi.ac.kr)

** 경기대학교 토목공학과 석사과정

School of Civil Engineering, College of Engineering, Kyonggi University, Seoul 120-702, Korea.

*** (주)이산 수자원부 부장

#1608-4 Dong-a Plaza Gwanyang-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyonggi-do 431-060, Korea.

1. 서 론

도시유역에서 강우시 배수시스템으로 유입되는 CSOs (Combined Sewer Over Flows)의 유량 및 수질은 강우, 지형 및 토지이용 등의 조건에 따라 그 부하특성이 다르며, 비점오염물질의 양과 발생경로가 불명확하므로 그 중요성에도 불구하고 정량적 분석에 어려움이 많다. 이를 해석하기 위하여 SWMM, MOUSE 모형 등이 사용되고 있으며, 국내에서는 수질모의가 가능한 ILLUDAS-NPS 모형(김태화 등, 2005)이 제시된 바 있다. 또한 국토해양부 도시홍수재해관리연구단(2003~2008)의 FFC2Q 모형(국토해양부, 2008)에서는 CSOs의 산정이 가능한 WQUAL블록을 개발한 바 있다.

이 연구에서는 강우의 지속시간, 분포 및 오염물 축적과 쓸림 등의 조건에 따른 CSOs의 오염물 부하특성을 근자배수구역에서의 3개 강우사상에 대하여 FFC2Q으로 모의하고 계산결과를 실측치와 비교하여 그 적용성을 검토하였으며, 주요 비점부하량 산정 관련 수질매개변수의 선택과 그 민감도를 분석하였다. 또한 기존모형 SWMM, MOUSE와의 비교를 통하여 그 실용성을 평가하였다. FFC2Q 모형은 주요 검토항목 대상을 중심으로 입력 자료를 단순화 하였음에도 불구하고 기존모형과 대등한 유출, 해석기능을 수행하는 것으로 판단되었다.

또한, 강우 초기시의 유출량과 오염부하량과의 관계성을 검토하였으며, 강우 분포와 지속시간에 따른 유출량과 비점오염성분의 부하특성을 분석하였다.

2. WQUAL의 기본이론

WQUAL에서는 강우 초기 비점오염 물질의 축적량과 부하량을 계산하며, 이때의 유출은 LNDFLOW와 CONFLOW블록으로 산정한다. 건기시의 유량 및 수질 계산은 계수지정법을, 우기시의 유출해석은 투수지역과 불투수지역으로 구분하고, 각 소유역의 형상을 고려하여 Clark 방법과 시간-면적곡선법을 선택하여 계산할 수 있다. 오염부하량은 오염물 축적량산정식과 쓸림방정식 및 기여계수를 적용하여 계산시간별 오염물질 부하량 및 농도 등을 계산한다. 비점오염물의 축적량은 일오염물축적법, Power-Linear법, Exponential법, Michaelis-Menton법 중에서 선택하여 모의하며, 쓸림량의 계산은 지수형 쓸림 방정식에 의해 각 수질항목(SUS, SET, BOD₅, COD, TN, TP, COLI)에 대한 해석이 가능하다. 특히 WQUAL에서는 오염성분간의 영향을 고려한 기여계수를 적용 배수구역의 부하특성을 고려하여 사용자가 지정할 수 있도록 하였다.

2.1 오염물 축적과 쓸림량 산정

2.1.1 오염물의 축적 (Buildup)

유역의 지표면 오염물 축적량은 배수유역의 면적, 토지이용도, 건기일수 등에 영향을 받으며 축적 계수 및 지수들에 의하여 유역의 특성을 반영하여 일오염물축적법, Power-Linear법, Exponential법 및 Michaelis-Menton법 중에서 선택하여 계산한다 (Eqs. (1)~(4)).

① 일오염물축적법

$$P_j = \sum (p_{i,j} A_p A D_n) \quad (1)$$

② Power-Linear법

$$P_j = C_p D_n^{K_p} \quad (2)$$

$$P_j \leq P_L$$

③ Exponential법

$$P_j = P_L (1 - e^{-K_r D_n}) \quad (3)$$

④ Michaelis-Menton법

$$P_j = \frac{P_L D_n}{C_p + D_n} \quad (4)$$

여기서, P_j : 수질항목별(j) 오염물 축적량 (kg)

$p_{i,j}$: 소유역별(i), 수질항목별(j) 오염물 축적량 (kg)

A_p : 소유역 면적 중 해당 토지이용 면적비

A : 소유역의 총 유역면적 (ha)

D_n : 건기일수 (day)

P_L : 오염물의 한계축적량 (kg)

C_p : 축적계수 (kg/ha/day)

K_p : 축적지수 (Power)

이들 방법 중에서 일오염물축적법은 소유역별 토지이용 및 면적을 직접 고려한 면에서 장점이 있다. 그러나 실제로 소유역별 토지이용별 축적량에 대한 실측치를 확보함에는 어려움이 있다. 다른 방법들에서의 축적계수와 지수들은 관측치 및 경험으로부터 탄력적으로 선택할 수 있으나 오염물 축적 한계치와 더불어 계산결과에 큰 영향을 미친다.

이 연구에서는 축적계수와 축적지수 및 건기일수에 따른 각 방법별 오염물 누가축적량의 증가선형을 비교 검토하였다. 즉, Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 Power-Linear법과 Exponential법에서는 산정치가 시간에 따라 증가하다가 한계치에 접근하게 된다. 축적계수와 지수에 따라 한계치에 이르는 건기일수에는 차이가 있었으

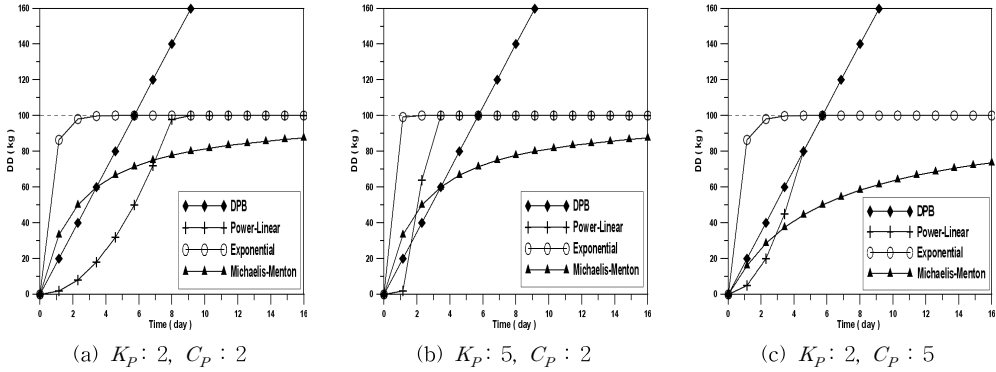


Fig. 1. Buildup Equation Function Types

며, Exponential법은 건기일수에 따라 한계축적량에 빠르게 수렴하였다. 그러나 Michaelis-Menton법은 건기일수가 길어져도 한계치에는 수렴하지는 않으며 오히려 축적계수의 영향이 큰 것으로 나타났다. 그러나 이 때의 한계 축적량은 임의의 값 100 kg, 관련 계수와 지수는 동일하게 부여한 것임으로, 실제로 산정식이 선정되면 해당 매개변수의 최적치를 선택하는 과정이 중요하며 이에 대하여서는 4.1절에서 설명하였다.

2.1.2 오염물의 쓸림 (Washoff)

WQUAL에서는 축적된 각 오염물질들이 유출강도에 의하여 쓸려나가는 양을 계산하기 위하여 다음의 오염성분별 쓸림방정식들을 사용하였다.

$$M_{SUS} = \alpha_{SUS} P_{SUS} (1 - e^{-KR_t}) \quad (5)$$

$$M_{SET} = \beta_{SET} P_{SET} (1 - e^{-KR_t}) \quad (6)$$

$$M_{BOD_5} = P_{BOD_5} (1 - e^{-KR_t}) + \alpha_{BOD_5} M_{SS} + \beta_{BOD_5} M_{SET} \quad (7)$$

$$M_{COD} = P_{COD} (1 - e^{-KR_t}) + \alpha_{COD} M_{BOD_5} \quad (8)$$

$$M_{TN} = P_{TN} (1 - e^{-KR_t}) + \alpha_{TN} M_{SS} + \beta_{TN} M_{SET} \quad (9)$$

$$M_{TP} = P_{TP} (1 - e^{-KR_t}) + \alpha_{TP} M_{SS} + \beta_{TP} M_{SET} \quad (10)$$

$$M = P_{COLL} (1 - e^{-KR_t}) \quad (11)$$

여기서, $M_{SUS, SET, BOD_5, COD, TN, TP, COLL}$: 수질항목별 오염물질 부하량 (kg)

$\alpha_{SUS, BOD_5, COD, TN, TP}$: 수질항목별 부유물질 (MSUS)에 의한 오염물질 기여계수

$\beta_{SET, BOD_5, TN, TP}$: 수질항목별 침강물질 (M_{SET})에 의한 오염물질 기여계수

$P_{SUS, SET, BOD_5, COD, TN, TP, COLL}$: 수질항목별 축적량 (kg)

K : 쓸림감쇠계수 (mm^{-1})

R_t : 유출강도 ($mm/\Delta t$)

위의 식들은 기존의 모형에서도 채택한 형식이나 본 모형에서는 오염성분간의 기여계수를 도입함으로써 유역의 오염부하특성을 보다 능률적으로 산정할 수 있도록 한 면에서 차이가 있다. 이두진 등 (2003)의 연구에서는 SS와 TP, 그리고 COD의 부하량 간에는 높은 상관성이 있음으로 조사분석한 바 있다. Metcalf and Eddy (1971)은 위 식에서의 부유성과 침강성 물질의 기여계수 ($\alpha_{SUS}, \beta_{SET}$)를 BOD₅에는 2%와 10%, TN에는 1%와 5%, 그리고 TP에는 0.1%와 0.5%로 각각 보았으며, COD에는 BOD₅의 10%가 영향을 미치는 것으로 분석한 바 있다. WQUAL에서는 이를 기본 값으로 하되 검토대상 배수유역에 따라 사용자가 각각 선택할 수도 있도록 함으로써 실용에 편리하도록 하였다.

3. 주요 매개변수 및 적용성

3.1 적용배수구역 및 강우

검토 모형에 의한 오염부하량의 계산과 이에 사용되는 주요 매개변수 값들의 선택 및 민감도를 판단하기 위하여 서울시 중랑천 유역에 위치한 복합 주거지역인 군자배수구역 (광진구)을 시험 유역으로 선정하고 강우, 유출 및 수질자료들을 실측하였다.

군자배수구역의 유역면적은 96.4 ha, 유역평균경사 2.1%인 소규모 유역으로 상류부는 산지, 중하류부는 주거지와 상업지로 구성된 복합주거지역으로 구성되어 있다 (Table 1).

이 배수구역의 소유역 분할도 및 주 관거의 모식도는 다음의 Figs. 2 and 3과 같다. 주 관로는 1.7×1.7 m의 압거이며, 지선은 700 mm 원형관로로 구성되어 있다.

Table 1. Drainage Status

Name of basin	Area (ha)	Land use (%)			
		Residential/ Commercial	Public Facilities	Greens	Etc
Gunja	96.4	48	5	25	22

Table 2. Gunja Drainage Rainfall Data

Rainfall case	Time	Antecedent dry days (day)	Total rainfall (mm)	Rainfall distribution
E 1	2005. 4. 6. 15:40 ~ 23:50	2	4.5	Double peak
E 2	2005. 5. 17. 19:00 ~ 22:00	10	9.5	Double peak
E 3	2005. 8. 24. 20:30 ~ 21:20	4	7.5	Central

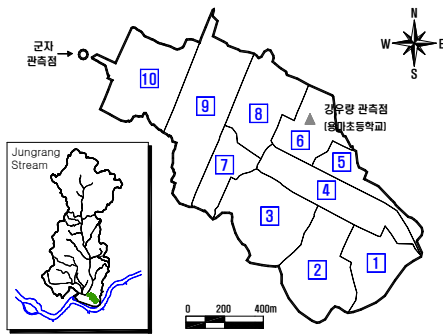


Fig. 2. Subdivisions of Gunja Drainage

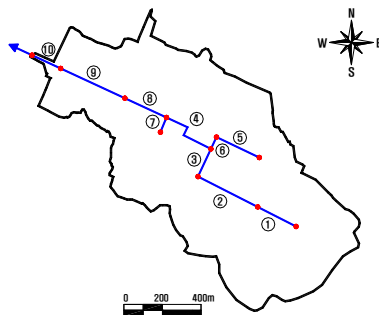


Fig. 3. Main Sewer System of Gunja Drainage

우수관거는 1차 지선까지만을 고려하여 10개의 소유역으로 구분하였다

이 배수구역내 및 인근의 수문관측시설로는 기상청 관할 자기우량계 (AWS)와 국토해양부 건설기술혁신사업으로 시행되고 있는 도시홍수재해관리기술연구단 (이하 연구단)의 자동관측우량계가 있다. 이 연구에서는 이 배수구역내에 위치한 용마초등학교의 우량자료를 채택하는 것이 타당한 것으로 판단하였으며, 다음의 3개 강우사상에 대하여 유역의 출구에서 유출량 및 수질관측 실시하였다 (Table 2).

3.2 주요 매개변수와 민감도

오염성분의 농도 및 부하량에 크게 영향을 미치는 매개변수로는 축적관련 매개변수와 쓸림관련 매개변수로 구분할 수 있다. 유출 및 수질매개변수의 보정을 위해 3개 강우 사상에 대한 실측치와 모의치의 상대오차를 최소화하는 최적 매개변수를 시행착오법으로 선정하여 수질성분별 입력자료를 구성하였다.

먼저, 비점원 오염부하량 산정과 관련하여 오염물 축적 산정식별 최적 매개변수값을 적용하고 계산결과

를 비교 검토하였다. 산정 방법은 Fig. 1에서와 같이 상이한 형식으로 나타내고 있으나, 각 방법별 적정 매개변수의 적용으로 서로 유사한 모의가 가능하였다. 즉, 각 산정식에 대하여 최적매개변수를 적용한 결과 Fig. 4에서와 같이 오염성분별 부하곡선들은 침투농도, 침투농도 발생시간 등에서 관측치에 근접한 거동을 보였다.

이 때 유출해석은 시간-면적법을 적용하였으며, 관련 매개변수는 허성철 등 (2008)의 성과를 사용하였다.

한편, 앞에서의 최적매개변수 값을 기준 값으로 하는 상대오차가 계산 결과치에 미치는 민감도를 검토하였다.

수질 항목별 강우초기의 오염물질 축적량 계산에 적용되는 매개변수들로서, 전반적으로 건기일수와 한계축적량은 모든 방법에서 계산결과에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이 때 건기일수는 기후조건에 의해 결정되는 사항임으로 비 경험적 계수이다.

일오염물축적법에서는 소유역별 토지이용별 축적량은 계산결과에 직접적인 영향을 주었고, Power-Linear 방법에서는 축적계수와 한계축적량이 가장 민감하였으며, 대장균에 대해서는 축적지수의 민감도가 크게 나타

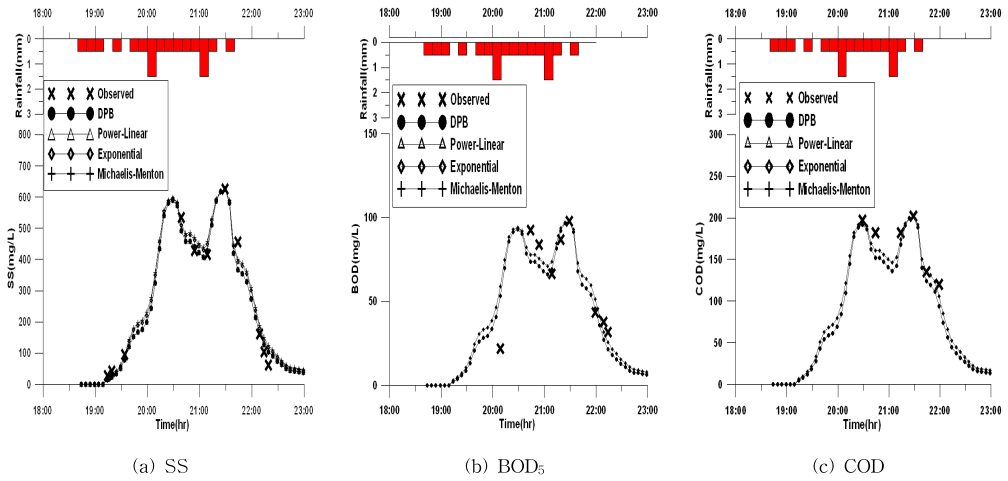


Fig. 4. Comparison of Buildup Equations (E2)

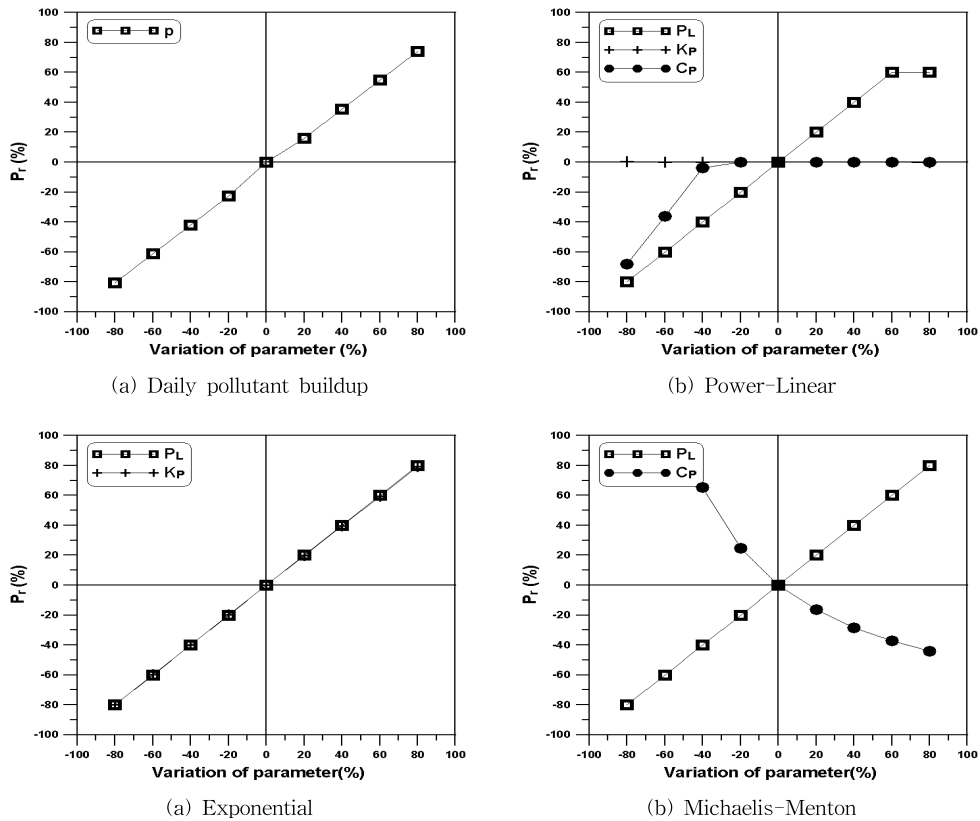


Fig. 5. Sensitivity of Water Quality-Related Parameter (SS)

났다. Exponential 방법에서는 한계축적량 및 축적지수가 민감하게 나타났다. Michaelis-Menton 방법에서 한계축적량은 축적량에 1차선형적으로 작용하며, 축적계

수의 증가는 축적량의 감소에 기여하였다. 이들 방법들은 모두 오염물 축적한계량에 제한을 받기 때문에 한계축적량을 너무 작은 값으로 설정하였을 때는 축적 지수

및 계수를 증가시켜도 반응이 나타나지 않았다. 이때 민감도 Pr은 각 변수의 변화구간에서 발생하는 각 성분별 계산결과(침투치)의 기준(최적)값에 대한 비율(%)로서 Fig. 5는 SS에 관한 것이다. 한편, 쓸림량 산정 매개변수로서 감쇠계수 모든 축적량 산정방법에 의한 계산결과에 직접적인 영향을 주는 것으로 분석되었다.

3.3 기존 모형과의 비교검토

유출 및 수질해석을 위하여 사용하고 있는 주요 해석 기법에 대하여 FFC2Q와 SWMM, MOUSE 모형과의 차이점과 유사점을 비교 검토하였으며, 특히 수질 성분별 비점오염 부하량산정 결과를 중심으로 계산 비교하였다(Table 3).

FFC2Q 모형에서 유효유량 산정방법은 투수지역과 불투수지역으로 구분하여 계산하며, 투수지역에서는 토양형에 따른 Horton 계수를 이용한 방법과 토지이용현황을 고려한 NRCS 방법을 선택 적용할 수 있도록 하였다. 지표면 유출해석에서 SWMM 및 MOUSE은 투수지역과 불투수지역에 같은 방법을 적용하였으나, FFC2Q 모형에서는 투수지역과 불투수지역에 대하여

Clark합성단위도법 및 시간-면적곡선법을 선택하여 적용할 수 있도록 개발하였다. 또한, 다른 모형들이 모든 소유역을 직사각형 형태로 단순화하여 계산하는 반면에 본 개발모형에서는 유역의 형태를 다양화하여 유역형상에 따른 유출특성을 반영하였다(허성철 등, 2008).

FFC2Q, SWMM에서는 오염물질의 지면 축적량을 토지이용 및 오염물질 종류와 건기일수 등을 고려하여 4가지 방법으로 계산하며, MOUSE에서는 토사유출량이 오염성분을 주로 지배하는 것으로 보아 해석한다. 모든 모형에서 강우로 인한 오염물의 쓸림량은 축적량에 비례하며, 유출강도와 쓸림감쇠계수 등을 고려 산정한다. FFC2Q, SWMM, MOUSE 모형에서는 SS, BOD₅, COD, TN, TP, 대장균 등의 주요 수질 항목에 대한 모의가 가능하며, 특히 FFC2Q에서는 수질 항목간의 상관성을 고려한 기여계수를 도입하였다. 한편, 관가내의 오염물 이송을 모의하기 위하여 FFC2Q와 MOUSE 모형에서는 이송과 확산방정식을 적용할 수 있으며, SWMM 모형에서는 연속방정식을 사용한다(Huber and Dickinson, 1988; DHI, 2004).

FFC2Q모형으로 실 강우사상에 대하여 모의하고 계산 결과를 실측치 및 기존의 모형들과 비교함으로써 그 적용성을 평가하였다. 먼저, 강우량이 적었던 강우사상

Table 3. Comparison of Model Theories and Functions

Model		FFC2Q	SWMM	MOUSE
Rainfall type		· Single storm	· Single storm · Continuous storm	· Single storm · Continuous storm
Effective rainfall		· Horton · NRCS	· Horton · Green-Ampt	· Initial loss, reduction coefficient · Horton
Runoff	Ground surface	· Kinematic wave · Time area curve · Clark method	· Kinematic wave	· Time area curve · Unit hydrograph
	Pipe	· Kinematic wave · Dynamic wave	· Kinematic wave · Dynamic wave	· Kinematic wave · Diffusion wave · Dynamic wave
Water quality	Buildup	· Daily pollutant buildup · Power-Linear · Exponential · Michaelis-Menton	· Power-Linear · Exponential · Michaelis-Menton	· By sediment pollutant buildup
	Washoff	· Exponential function · Contributing coefficient	· Exponential function	· Exponential function
	Pipe	· Diffusion, dispersion equation	· Continuity equation	· Diffusion, dispersion equation
	Items	· BOD, SS, COD, T-N, T-P, COLI, etc. 7	· BOD, SS, COD, T-N, T-P, etc. 10	· BOD, SS, COD, T-N, T-P, etc. 10
Convenience		Simple	Complex	Complex

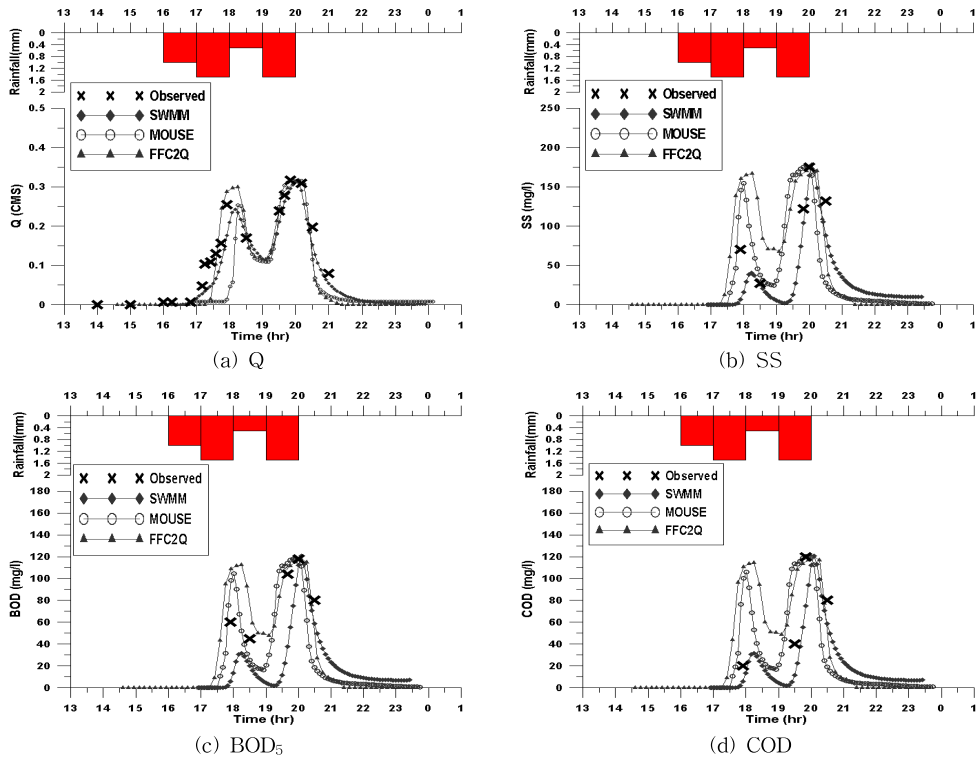


Fig. 6. Comparison of Simulation Results for Discharge and Pollutants (E1)

Table 4. Comparison of Model Simulation Results (E1)

Classification	Item		Observed	FFC2Q	SWMM	MOUSE
Runoff	Peak flow (CMS)		0.317	0.317	0.314	0.316
	Peak time (hr)		4.16	4.33	4.33	4.33
Water quality	SS	Peak concentration (mg/L)	175.0	175.0	178.4	175.5
		Peak time (hr)	4.33	4.33	4.33	4.33
	BOD ₅	Peak concentration (mg/L)	118.0	118.0	120.5	118.2
		Peak time (hr)	4.33	4.33	4.33	4.33
	COD	Peak concentration (mg/L)	120.0	120.5	120.5	120.3
		Peak time (hr)	4.16	4.33	4.33	4.33

E1에서 이 모형은 유출수문곡선형에서 SWMM모형과 유사하였으며, MOUSE와는 상층부에서 차이가 있었다. 그러나 침투유량은 각 모형 모두 실측치에 근사하였다. 모형간의 유출량 계산의 차이로 인해 오염농도 곡선에서도 약간의 차이가 발생하였으나, 수질 항목별로 비교한 결과 개발모형은 실측치에 보다 근접하였으며, 침투치 발생시간은 적용모형 모두 실측치에 근접하는 유사한 결과를 나타내었다 (Fig. 6, Table 4).

두 번째 강우사상 (E2)에서는 유출수문곡선형은 SWMM 모형이 실측치에 가장 유사하였으나 침투유량 발생시간은 모두 실측치에 유사하였다. SS의 분석 결과 침투농도의 실측치가 626.0 mg/L로서 SWMM은 625.0, MOUSE 626.2, FFC2Q는 626.0 mg/L로서 모두 실측치에 근사하였다. 다른 수질 항목에서도 개발모형의 모의결과는 실측치에 가장 유사한 값으로 모의가 되었으며, 특히 오염물 농도곡선의 형태에서 개발모형은 다른 모형에 비

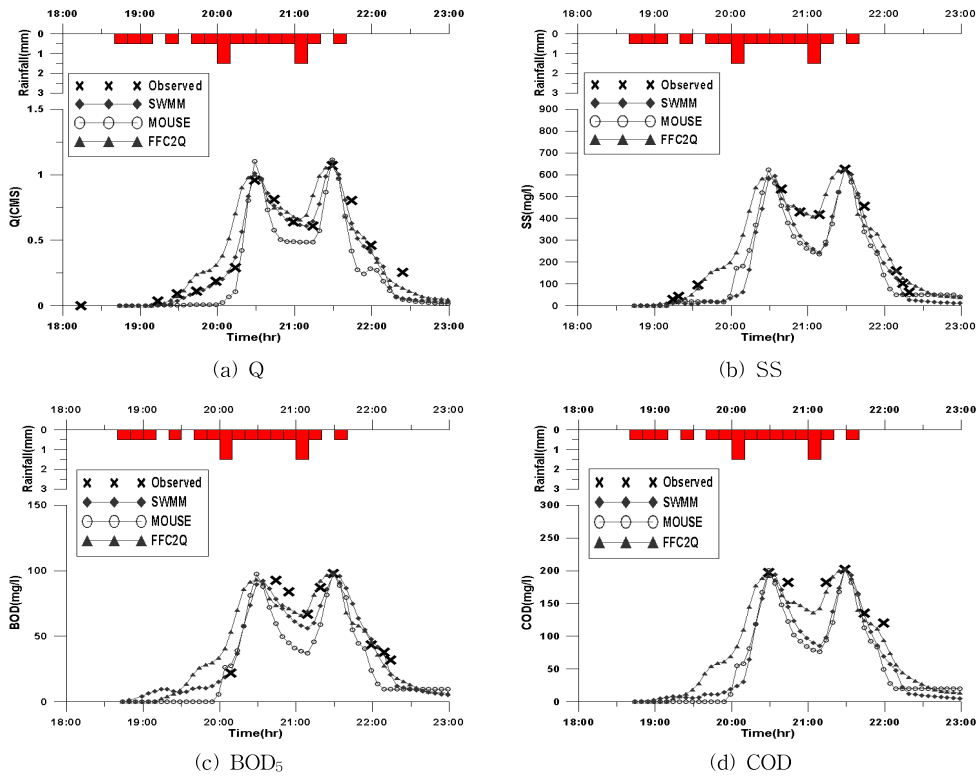


Fig. 7. Comparison of Simulation Results for Discharge and Pollutants (E2)

Table 5. Comparison of Model Simulation Results (E2)

Classification	Item		Observed	FFC2Q	SWMM	MOUSE
Runoff	Peak flow (CMS)		1.07	1.07	1.09	1.11
	Peak time (hrs)		2.81	2.83	2.83	2.83
NPS	SS	Peak concentration (mg/L)	626.0	626.0	625.0	626.2
		Peak time (hrs)	2.83	2.83	2.83	2.83
	BOD ₅	Peak concentration (mg/L)	98.0	98.0	96.7	98.2
		Peak time (hrs)	2.83	2.83	2.83	2.83
	COD	Peak concentration (mg/L)	202.0	202.0	202.2	201.9
		Peak time (hrs)	2.83	2.83	2.83	2.83

해 실측치에 유사한 거동을 나타내었다. 한편, 침투농도 발생시간은 적용모형들 모두 근접한 결과를 보였다 (Fig. 7, Table 5).

세 번째 강우사상 (E3)의 경우에는 유출수문곡선의 형태와 침투유량에서 개발모형이 실측치와 가장 유사한 결과를 나타내었다. 각 수질항목별 비교 결과 개발모형과 SWMM이 실측치에 가장 근접하였다. 침투발생시간은 개발모형과 MOUSE에서 동일한 결과를 나타내었으

며 SWMM에서는 약간 늦게 발생하였다 (Fig. 8, Table 6).

이상의 3개 강우사상에 대한 유출, 수질 및 관련 매개변수에 대한 종합적 비교검토 결과 FFC2Q모형은 강우조건에 따라 차이는 있지만 관측치에 근접한 모의 결과를 안정적으로 보여주었으며, 기존 모형들과의 비교에서도 검토 항목에 따라 차이는 보였으나 전반적으로 대등한 계산결과들을 보여주었다.

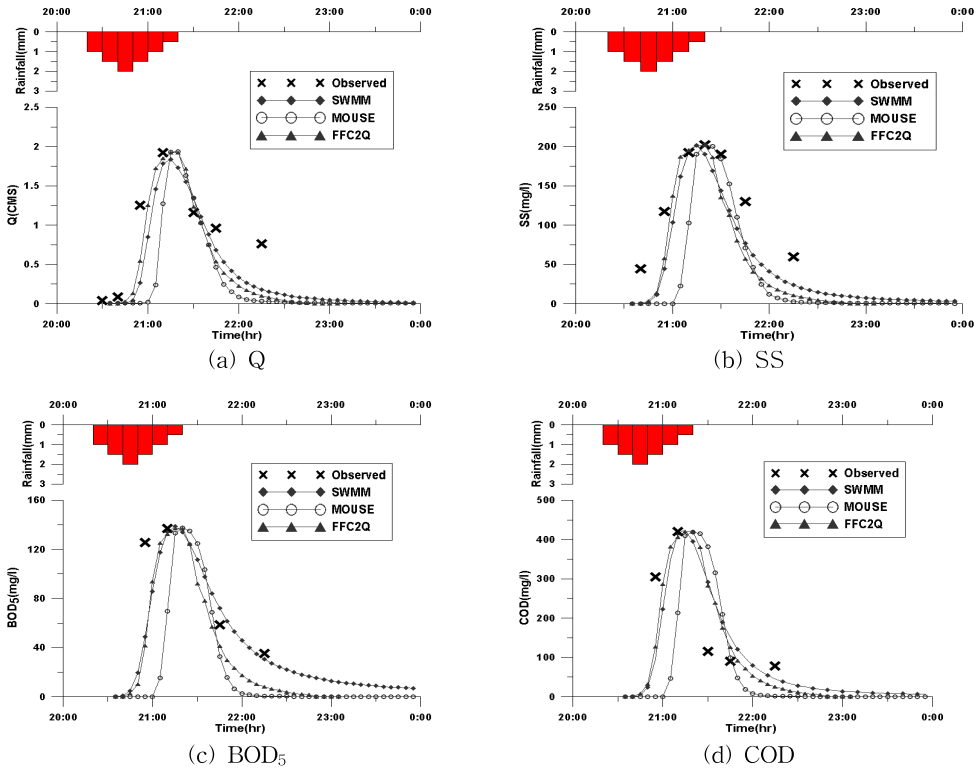


Fig. 8. Comparison of Simulation Results for Discharge and Pollutants (E3)

Table 6. Comparison of Model Simulation Results (E3)

Classification	Item		Observed	FFC2Q	SWMM	MOUSE
Runoff	Peak flow (CMS)		1.924	1.924	1.838	1.933
	Peak time (hr)		0.83	0.83	0.83	0.83
Water quality	SS	Peak concentration (mg/L)	202.4	202.4	201.2	202.3
		Peak time (hr)	0.99	0.83	0.92	0.83
	BOD ₅	Peak concentration (mg/L)	137.2	137.2	138.6	137.3
		Peak time (hr)	0.83	0.83	0.92	0.83
	COD	Peak concentration (mg/L)	420.0	420.0	426.6	419.5
		Peak time (hr)	0.83	0.83	0.92	0.83

4. 강우에 의한 오염부하량 분석

4.1 유출량과 오염물부하량

초기강우에 의한 CSOs의 유량과 오염물부하량을 산정하고 그 관계성을 앞에서의 3개 강우조건에서 검토하였다. 이때의 유량은 시간면적법, 비점오염물 축적량은 일오염물축적법, 그리고 오염물슬림량은 슬림계수와 기어계수를 고려하였다. 검토결과는 유출량의 상승구간

에서 임의 시간 유출량(q)의 첨두유출량(Q)에 대한 비(q/Q)와 각 오염성분 농도(p)의 첨두농도(P)에 대한 비(p/P)로 표현하였다. Fig. 9의 무차원 분포곡선에서 SS, BOD₅ 등의 값은 유출량에 비해 크게 분포함으로써 초기 강우시 오염부하량의 증가율은 유출량에 비해 상대적으로 큼을 알 수 있다. 이는 이두진 등 (2003)의 연구에서 총 유출오염부하량의 50%가 누적유출 유량의 15~20% 사이에 있는 것으로 분석한 내용과도 상응하는

결과이다. 또한 BOD₅, COD 등은 SS에 비하여 부하량 증가가 크게 나타나는 경향을 보였다 (Fig. 9). 이는 오염성분들의 지표면 소류력에 저항하는 정도에 차이로 인한 것으로서 강우 초기에는 비교적 가벼운 성분의 이동이 보다 활발할 것으로 추정된다.

금번 검토 대상인 3개 강우는 모두 강도가 작고 지속시간도 짧은 편으로서 침투유출량이 발생하는 시간과 거의 같은 시간에 침투오염부하량이 발생하였으나, 강우 지속시간이 보다 긴 경우에는 강우초기에 비점오염

물의 부하량이 집중되며, 그 이후에는 유출량이 증가하더라도 오염부하량의 증가는 둔화될 것으로 판단된다.

4.2 강우분포 및 지속시간과 오염부하량

비점오염물의 쓸림은 강우의 분포, 시간 및 강도에 따라 영향을 받게 되며 특히 강우의 초기에 그 영향은 크다. 강우분포 조건에 다른 오염물의 부하특성을 분석하기 위하여 Huff의 4분위법을 적용하였다 (건설교통부, 2000). 즉, 서울지역의 1~4분위 분포에서 10년 빈도의

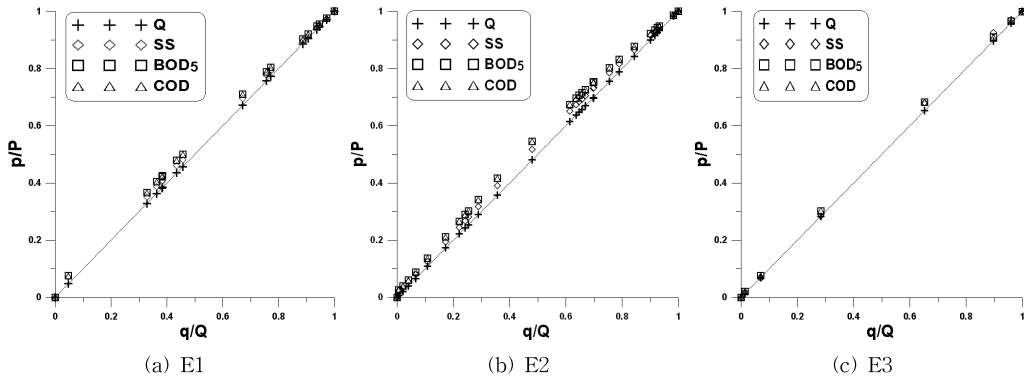


Fig. 9. Dimensionless Comparison of Runoff and Pollutant Loads

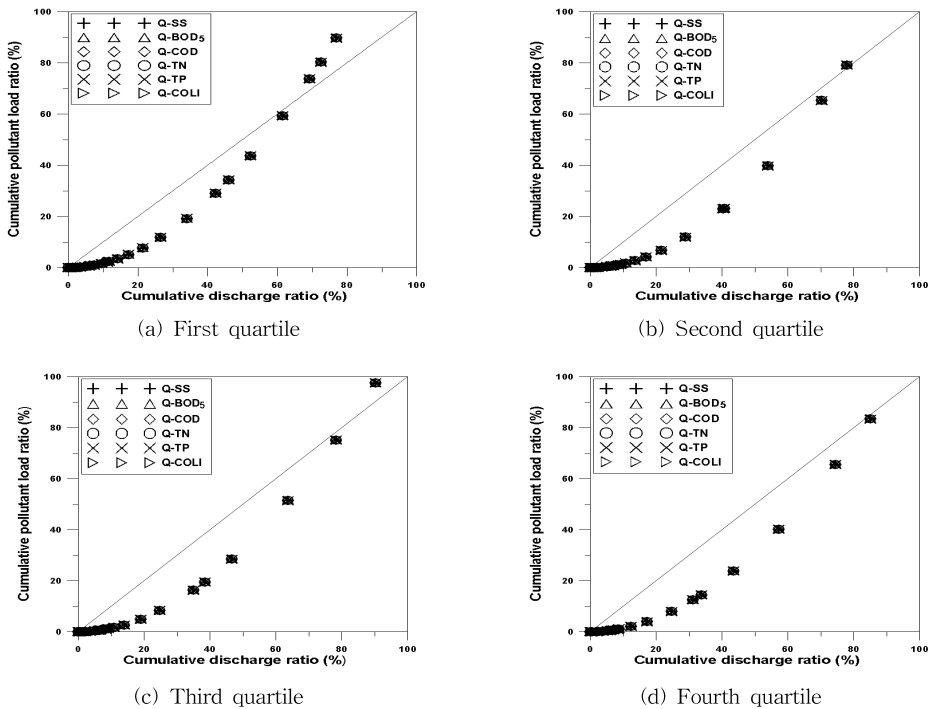


Fig. 10. Rainfall Distribution Effect on Runoff and Pollutant Loads (Huff, 10-yr)

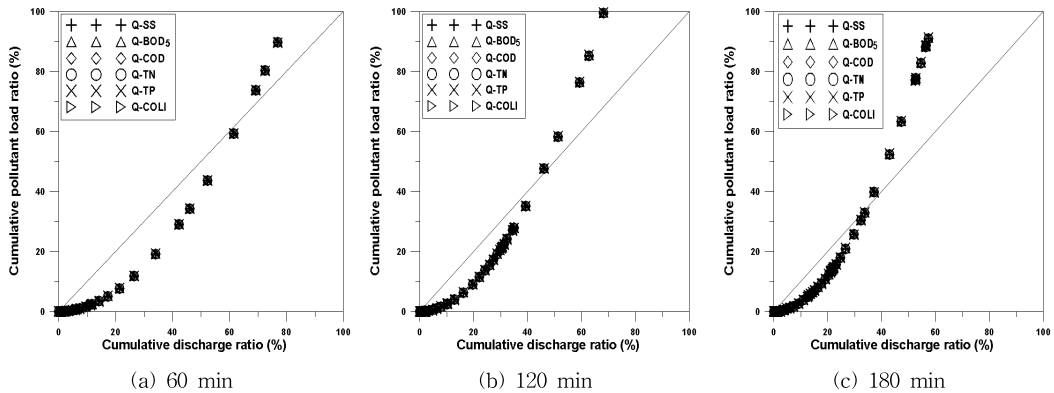


Fig. 11. Rainfall Duration and Pollutant Loads (Huff 1, 10-yr)

유출량에 따른 오염부하량을 군자배수구역에 대하여 분석하였다. Fig. 10은 유출량과 오염부하량의 관계를 누적유출량과 누적오염부하량으로 표현한 것으로서 Huff1 분위에서 무차원 곡선의 기울기가 가장 급하게 나타남을 보여주고 있는바 이는 강우초기의 강우량집중은 오염부하량의 증가에 크게 기여하고 있음을 보여주고 있어, 강우분포는 오염부하량에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. Fig. 10에서 오염성분간의 근소한 계산 결과치들은 중첩된 형태로 나타나고 있으며, 이는 각 수질성분의 강우에 의한 부하특성이 유사함을 의미하기도 한다.

한편, 강우 초기의 집중도가 큰 Huff1 분포에서 강우 지속시간에 따른 오염물 부하특성을 검토하였다. 대체로 무차원 곡선형은 유사하게 나타났으나 지속시간이 길수록 급하게 나타났다. 이는 CSOs에 의한 비점오염물의 부하는 강우 초기의 일정 시간대에서의 집중적으로 발생함을 의미하며 강우 초·중반의 시간대에서 총부하량에 달함을 보여주고 있다 (Fig. 11).

5. 결론 및 요약

이 논문에서는 FFC2Q (WQUAL) 모형의 기본이론을 검토하고 그 적용성을 분석하였다. 서울시 군자배수구역의 실제 강우를 대상으로 계산치와 실측치와의 비교를 통한 오염물의 축적 및 쓸림량 산정과 이를 위한 주요 매개변수의 선택 및 그 영향을 검토하고, 기존 모형 SWMM과 MOUSE과 비교하였다. 또한, 도시 지역에서의 CSOs 비점오염물 부하량을 강우 분포, 지속시간에 따라 산정하고 부하특성을 분석하였다.

- (1) 비점오염축적량 산정식은 각 방법에서 상이한 함수형을 보이나 실측치와의 비교를 통한 각 방법별 최적매개변수의 선택으로 계산결과에 주는 차이는 크

지 않음을 알 수 있었다. 한계축적량은 모든 방법에서 큰 영향을 주며, 축적지수의 영향도 컸다. 쓸림량 산정에서 쓸림감쇠계수의 영향이 크며 오염성분별로 기여계수를 활용으로써 침투농도, 발생시간 등에서 관측치와 유사한 모의가 가능하였다.

- (2) 실측 강우사상에 대한 유출, 수질 및 관련 매개변수에 대한 종합적 비교검토 결과, 모형 FFC2Q (WQUAL)는 강우조건에 따라 차이는 있지만 관측치에 근접한 모의 결과를 안정적으로 보여주었으며, 기존의 모형 SWMM 및 MOUSE와의 비교에서도 검토 항목에 따라 차이는 보였으나 전반적으로 유사한 계산결과들을 보여주었다.
- (3) 초기 강우시의 오염부하량의 증가율은 유출량에 비해 상대적으로 컸으며, BOD₅, COD 등은 강우 초기 시 부하량이 SS보다 크게 증가하는 경향을 보였다. 이는 오염성분들의 지표면 소류력에 저항하는 정도의 차이로 인한 것으로서 강우 초기에는 비교적 가벼운 성분의 이동이 보다 용이한데 기인하는 것으로 판단된다.
- (4) Huff1 분위에서 초기의 강우량 집중은 오염부하량의 증가에 크게 기여하고 있음을 보여주었으며, 이 범위보다 더 길게 지속되는 강우는 CSOs의 오염부하에 주는 영향이 급격히 감소되는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술혁신사업 (03산학연 C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2000). **지역적 설계강우의 시간적 분포**. pp. 62-65.
- 국토해양부, 도시홍수재해관리기술연구단 (2008). FFC-G2 도시유역유출·수질해석모형의 실무적용 가이드라인. pp. 309.
- 국토해양부, 도시홍수재해관리기술연구단 (2008). **FFC MODEL(사용자설명서)**, pp. 45-159.
- 김태화, 이종태 (2005). “도시유역의 유출·수질해석을 위한 ILLUDAS-NPS모형”. **한국수자원학회논문집**, 제 38권, 제9호, pp. 791-800.
- 이두진, 윤현식, 신응배 (2003). “도시지역 합류식 하수 관거의 발생특성 및 오염기원평가”. **대한토목학회논문집**, 제23권, 제6B호, pp. 597-606.
- 허성철, 박상식, 이종태 (2008). “유역형상을 고려한 도시 단위 소유역의 유출 해석”. **한국수자원학회논문집**, 41(5), pp. 491-501.
- Danish Hydraulic Institute (2004). *MOUSE TRAP version 2004: User manual*. DHI, pp. 7-2.
- Huber, W.C, Dickinson, R.E. (1988). *Stormwater Management Model Ver. 4, Part A : User's Manual*. E.P.A, pp. 59-282.
- Metcalf, Eddy (1971), University of Florida and Water Resources Engineers, Inc, *Storm Water Management Model, Volume I-Final Report. EPA Report 11024 DOC 07/71(NTIS PB-203289)*, Environmental Protection Agency, Washington, DC. pp. 352.

논문번호: 09-113	접수: 2009.09.29
수정일자: 2009.12.29/2010.01.21	심사완료: 2010.01.28