

설계강우조건에 따른 SWMM모형 매개변수의 민감도 분석

Sensitivity Analysis of the SWMM Model Parameters Based on Design Rainfall Condition

이 종 태* / 허 성 철** / 김 태 화**

Lee, Jong-Tae / Hur, Sung-Chul / Kim, Tae-Hwa

Abstract

This study is a sensitivity analysis of the parameters which affect the simulation results under various design rainfall conditions, using the SWMM model, for three selected basins in urban areas. The sensitivity of the peak flow rate is defined by $S_Q (=1.0 - (\text{min. ratio of peak flow rate}/\text{max. ratio of peak flow rate}))$, and the rainfall conditions are classified in terms of design rainfall frequency, duration, and distribution. The simulation results show that in most conditions the parameters - the impermeable area ratio, the sewer slope, and the initial infiltration capacity - have more significant effects on the results than other parameters. As the design rainfall frequency increases, the sensitivity of the sewer slope and sewer roughness increases, while the parameters related with the surface runoff decrease. When the rainfall duration increases, the sensitivities of most parameters of surface runoff and sewer flow decrease. Also, at the 1st quarterly Huff rainfall distribution condition, the impermeable area ratio has high sensitivity, but at the 4th quarterly condition the parameters related with sewer flow show higher sensitivities. These tendencies can be explained by considering the procedure for computing the effective rainfall and kinematic wave on the surface and sewer flow.

keywords : Sensitivity of Runoff Parameters, Rainfall Condition, SWMM

요 지

이 연구에서는 다양한 강우조건에 따른 도시유출모형, SWMM의 매개변수들이 계산 결과치에 주는 민감도를 분석하였으며 이를 위해 3개 배수구역에 대하여 모형을 적용하였다. 첨두 유출량에 대한 민감도는 $S_Q (=1.0 - (\text{첨두유출량의 최소값}(Q_{p,\text{min}})/\text{첨두유출량의 최대값}(Q_{p,\text{max}})))$ 로 나타내었으며 강우 조건으로서는 강우규모, 강우지속시간, 강우분포 등의 3가지를 채택하였다. 강우조건에 따라 전반적으로는 불투수면적비, 관로경사, 초기침투능 등이 계산 결과치에 주는 민감도가 큰 것으로 분석되었다. 강우규모의 증가에 따라 관로경사 및 조도계수에 의한 영향이 증가되었고, 강우규모가 작아질수록 지표면 유출관련 매개변수가 민감하였다. 한편, 강우지속시간의 증가에 따라 대부분의 지표면 유출 및 관거흐름에 대한 매개변수들의 민감도가 둔감해지는 경향을 보였다. 강우분포에 대하여서는 Huff 1분위에서는 불투수면적비가 가장 민감하였으며 4분위에서는 관거흐름과 관련된 매개변수들이 민감하였다. 이러한 경향은 유효우량의 계산과 지표 및 관거흐름에 대한 운동과 해석과정에 기인하는 것으로 설명될 수 있다.

핵심용어 : 유출 매개변수 민감도, 강우조건, SWMM

* 경기대학교 토목환경공학부 교수
71, 2-ka, Chungjung-Ro, Seodaemun-Gu, Seoul, Korea
(e-mail: jtlee@kyonggi.ac.kr)

** 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

도시하천 및 배수시설의 설계에서는 각종 설계 강우와 유역 및 배수계통 등의 각종 설계조건 변화에 따른 유출 특성을 분석하기 위하여 수치모형을 사용함에 앞서서 각 매개변수의 적정치 선정과 이들 값이 계산 결과치에 주는 영향을 검토해 두는 것은 매우 중요하다.

도시유출모형 매개변수의 민감도 분석에 관하여 Nix (1994)는 SWMM 모형에 대하여 매개변수의 보정에 앞서 민감도 분석결과를 제시한 바 있으며, 국내의 연구로서 강태호와 이종태(1998)는 SWMM 모형을 대상으로 유출 및 수질 매개변수들의 민감도분석을 하였고, 서규우(1998)는 RRL, ILLUDAS, SWMM, USRM 모형 등에 대하여 유역면적, 강우분포형 및 지속기간별로 총유출량비, 침투유출량비로서 민감도비를 산정하고 분석하였다. 또한, 채석준과 이정규(2000)는 ILLUDAS와 SWMM에 관하여 동대문구의 휘경과 용두 2개 우수지에 대하여 무차원의 입력 변수들을 적용하여 유역면적과 강우지속기간 및 분포형에 대한 민감도 분석을 통하여 미계측 도시 유역에서의 유출모형의 적합성을 검토하였다.

이 논문은 건설교통부 '도시홍수재해관리기술 연구단'의 제1차년도 연구성과로 발간된 기술보고서, 도시하천 유출해석모형의 특성비교(이종태외, 2004)의 연구내용 일부를 다시 정리한 것으로서, 이 논문에서는 기존의 연구성과들을 참고로 하면서 각종 설계 강우의 조건에 따른 SWMM 모형의 주요 유출 관련 매개변수들의 민감도를 종합적으로 검토하였다. 즉, 설계 강우조건으로서 강우규모, 지속시간, 분포형을 고려하였으며, 매개변수들을 유효강우·지표면유출·관로 등으로 구분하여 검토함으로써 실무에서 유출모형의 입력자료 구성시 사용자들의 판단을 용이하도록 하였으며, 모형의 적용성 향상에 기여코져 하였다.

2. 배수구역 및 강우조건

2.1 배수구역

모형의 적용 배수구역으로서 그 규모와 지형특성이 상이한 남가좌, Kings Creek, Gray Haven 배수구역 등을 선택함으로써 연구검토 결과의 보편성을 확보하려고 노력하였다.

남가좌 배수구역은 서울 홍제천 유역내에 위치하고 있으며, 유역면적은 약 0.203km²으로서 주거지와 상업지가 밀집한 중·하류부의 완경사 지역과 산지로 형성된 급경사 지역으로 구성되어 있다(이종태, 1996). 불투수면적 비율은 약 50%에 달하며 토양형은 대부분 A, B형으로 구성되어 있다. 이 배수구역 하수도의 주요간선은 암거(1.3×1.3m)로서 산지부에서부터 홍제천 합류점까지 연결되어 있으며 지선들은 원형관(Φ0.3~0.8m)으로 주택가와 상가지역을 통과하여 간선 하수도에 연결되는 합류식 구조이다(그림 1(a)).

Kings Creek 배수구역은 미국 Florida주 Dade지역에 위치하며, 토지이용현황은 대부분 아파트지역으로 구성되어 있고, 토양형의 대부분은 C형에 속한다. 유역면적은 약 0.059km², 불투수면적 비율은 약 70%이며, 나머지 투수지역은 잔디와 초목으로 구성되어 있는 완경사의 도시배수구역이다(Maksimovic, 1986). 배수관거의 경우 주요 간선관거는 직경 0.3~1.2m의 원형관으로서 구성되어 있다(그림 1(b)).

한편, Gray Haven 배수구역은 미국 Maryland주 Baltimore지역에 위치하며, 대부분 아파트지역으로 구성되어 있고, 토양형은 대부분 C형에 속하며, 유역면적은 약 0.094km², 불투수면적 비율은 약 52%이다(Maksimovic, 1986). 이 배수구역은 비교적 도시정비가 잘 이루어져 있으며 배수관거의 경우 주요 간선관거로서 직경 0.5~1.2m의 원형관이 직선형 형태로 이루어져

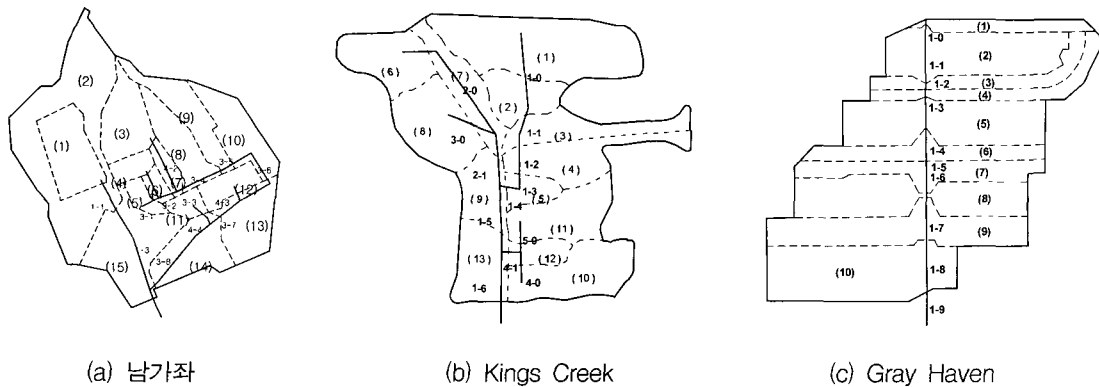


그림 1. 적용대상 배수구역

있어 유역폭 산정 및 투수, 불투수지역의 구분이 명확한 편이다(그림 1(c), 표 1).

2.2 적용강우

이 연구에서는 강우특성에 따른 민감도 분석을 위하여 모형에 적용하는 강우를 강우규모(5, 10, 20, 30년), 지속시간(30분, 1, 2, 3, 6시간), 분포형(Huff-1~4분위) 등으로 구분하였다.

재현기간 5, 10, 20, 30년에 대한 지속시간별 강우량 산정은, 서울지방 확률강우강도식(서울시, 2001)을 이용하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

검토대상 배수구역들에서의 도달시간은 모두 30분 전·후이며, 또한 평균 입계지속시간도 약 30분으로 분석되었다. 따라서 검토대상 강우지속시간을 최소 0.5시간으로 하고, 1시간, 2시간, 3시간, 6시간 등 일 때 강우 분포를 각각 구성하였다. 이때의 강우빈도는 10년, 분포형은 Huff 2분위를 기준으로 하였다.

한편, 강우분포형의 변화에 따른 민감도 분석에서는 10년 빈도, 지속시간 1시간을 택하였다.

3. 해석모형과 주요매개변수

SWMM(RUNOFF)모형의 주요 유출매개변수로는 지면저류, 초기침투능, 배수구역폭, 유역경사, 불투수면적,

조도계수, 관로길이, 관로경사, 관 조도계수 등이 있다 (Huber, 1988).

이 장에서는 주요 매개변수들을 유효강우량, 지표면 유출, 우수관로 등의 3가지 영역으로 구분하였으며, 주요 매개변수들과 관련되는 기본개념 및 관계식들을 다음과 같이 정리하였다.

3.1 유효강우량 관련 매개변수

유효강우량의 산정을 위해서는 초기손실, 침투능, 토양형, 선행토양함수조건 등을 고려하여야 한다. 투수 및 불투수지역의 강우손실량 산정을 위하여 모형에서 채택한 주요매개변수 및 계산과정들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 지면저류에 의한 손실량

강우초기의 손실량으로서 평균 지표면 저류깊이, d 는 다음과 같이 표현하였다. 즉,

$$d = x d_1 + (1 - x) d_2 \quad (1)$$

여기서, x 는 불투수 지역의 면적비, d_1 는 불투수지역의 지표면저류 깊이, d_2 는 투수지역의 지표면저류 깊이이다(표 3).

표 1. 배수구역 현황

배수 구역	위 치	면적 (km ²)	불투수면적 비율(%)	유역경사 (%)	토양형	토 지 이 용
남가좌	서울시 서대문구	0.203	50	20.00	A, B	산지 및 주거·상가 복합지역
Kings Creek	미국 Florida주 Dade지역	0.059	70	0.63	C	아파트 및 녹지
Gray Haven	미국 Maryland주 Baltimore지역	0.094	52	1.00	C	아파트 및 녹지

표 2. 강우규모·지속시간별 강우량

(단위 : mm)

지속시간	재현기간			
	5년	10년	20년	30년
30분	36.8	45.1	53.5	58.5
1시간	53.5	66.0	78.7	86.1
2시간	76.7	95.3	114.0	125.0
3시간	94.0	117.3	140.8	154.6
6시간	131.6	165.8	200.1	220.2

표 3. 지표면 오철로 인한 저류깊이

토 양 의 표 면 상 태			저 류 깊 이(cm)
불투수유역	포장된 유역		0.13 ~ 0.40
	지 붕	수 평	0.25 ~ 0.80
		경 사	0.13 ~ 0.25
투수유역	잔 디		0.50 ~ 1.25
	수 립		0.50 ~ 1.50

(2) 침투에 의한 손실량

투수지역의 침투량 산정을 위하여 SWMM 모형에서는 Horton 또는 Green-Ampt식을 선택할 수 있도록 하였다. 그러나 국내에서는 Green-Ampt식에 대한 기초자료와 적용성 검토가 충분하지 못하므로 Horton식(식 2)을 일반적으로 사용하며, 이 때 적용되는 SCS 토양형별 각종 계수의 기본값은 표 4와 같다.

$$F(t_p) = \int f_p dt = f_c t_p + \frac{1}{k} (f_o - f_c) (1 - e^{-kt_p}) \quad (2)$$

여기서, F는 임의시각 누기침투율(mm/hr), f_o는 초기침투율(mm/hr), f_c는 종기침투율(mm/hr), k는 감쇠계수, t_p는 강우 시작시간으로부터 경과된 시간(hr)이다.

3.2 지표면 유출 관련 매개변수

지표면 유출 관련 주요매개변수로는 불투수지역 면적, 지면경사, 유역폭, 유로길이 및 조도계수 등이 있으며, 조도계수를 제외하고는 매개변수값 선택이 비교적 용이하다. SWMM 모형에서 이들 주요매개변수들을 사용하여 계산하는 과정은 다음과 같다.

(1) 불투수지역 면적

분할된 소유역의 불투수율은 정밀한 항공사진과 토지이용도를 이용하여 그 정확도를 향상시킬 수 있다. 이때 배수구역을 작게 분할하여 분석하는 것이 바람직하나 유역이 크고 토지이용상태가 매우 복잡한 경우에는 몇 개의 대표 유역을 선정하여 세밀하게 분석한 후 나머지 유사한 유역에 대해서는 외삽법으로 보간하는 방법이 사용되기도 한다. 불투수지역 면적은 수리학적 으로 배수시스템에 직접 연결된 지역만 고려한다.

(2) 유로길이와 배수구역 폭

배수구역의 형상이 불규칙하고, 수로가 배수구역의 중심부를 관류하지 않을 경우에는 무차원 의곡도계수(skew factor)를 이용하며, 직사각형 소배수구역으로 가정하여 폭을 계산한다. 즉,

$$S_k = \frac{(A_2 - A_1)}{A} \quad (3)$$

여기서, S_k는 의곡도계수, A₁, A₂는 배수로 좌·우안의 집수면적, A는 배수구역전체의 면적 (A₁+A₂)을 나타내며, 이를 고려한 배수구역 폭, W는 다음의 식으로 산정된다.

$$W = L(2 - S_k) \quad (4)$$

여기서, L은 주 유로(배수로)의 길이로서 배수구역 폭에 일차적으로 영향을 준다.

(3) 지면경사

소배수구역의 지면경사는 지표면유출 경로를 따라 상류유역 끝에서 하류 유출부까지의 표고차이를 평균유로길이로 나눈 값을 사용한다. 유역의 형태가 단순한 경우에는 표고차를 유로길이로 나눈 값을 사용하나, 복잡한 경우에는 지표면 유출 경로별 유로 길이를 가중값으로 사용하여 전체유역의 경사값을 근사적으로 결정하기도 한다.

(4) 지표면 조도계수

지표면의 조도계수는 토지이용상태와 지표면 형상등에 따라 다양한 값을 갖으며, 또한 수심, 유량, Reynolds 수 등에 의해 영향을 받으므로 적정한 값의 선정에 어려움이 많다(표 5). 한편, 투수지역과 불투수지역을 합성한 경우의 매닝 조도계수는 조화평균을 사용한다. 즉,

$$\frac{1}{n} = \frac{x}{n_1} + \frac{(1-x)}{n_2} \quad (5)$$

여기서, x는 불투수지역 면적비, n₁는 불투수지역 조도계수, n₂는 투수지역 조도계수이다.

3.3 우수관로 관련 매개변수

관로와 관련된 주요매개변수들로서는 관로의 길이, 경사, 조도계수 등이 있으며, 우수관로의 흐름해석을 위한 비선형 저류방정식과 매닝식에 사용된다. 즉,

표 4. 침투량 산정계수

구 분	토 양 피 복 상 태			
	A	B	C	D
종기침투능 f _c (mm/hr)	25.4	12.7	6.4	2.5
초기침투능 f _o (mm/hr)	254	203	127	76
감쇠계수 k	2	2	2	2

표 5. 지표면 조도계수

토지 이용	조도 계수
상업지구	0.015 ~ 0.030
준 상업지구	0.020 ~ 0.035
고밀도 주거지역	0.025 ~ 0.040
저밀도 주거지역	0.030 ~ 0.055
공원	0.040 ~ 0.080

자료) Crawford and Linsley.(1966)

$$\Delta V = \Delta t (Q_I + Q_W + Q_{GW} - Q) \quad (6)$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (7)$$

여기서, ΔV 는 Δt 시간의 관로의 저류량이며, Q_I 는 유입량, Q_W 는 측방 유출입량, Q_{GW} 는 지하수 유출입량이다. 이 때, 유출량 Q 는 매닝식으로 산정된다.

4. 설계 강우의 조건과 민감도

설계 강우의 조건에 따라 주요매개변수들이 계산결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여는 먼저 각 매개변수의 기준 값이 적정하게 결정되어야 함을 전제로 한다. 따라서, 본 연구에서는 검토 배수구역 실측치와의 검증을 통한 주요 매개변수의 최적치들을 Rosenbrock 법(1996)에 의하여 결정하였고, 이들 최적 매개변수계수 값을 기준으로 하여 10%씩 그 값을 변화시켜 나가면서 최대 50%에서 최소 -50%까지의 범위내에서 각 강우조건에 따른 민감도를 분석하였다. 이 때 민감도, S_Q 는 각 매개변수의 변화구간(50%~ -50%)내에서 산정된 침투 유출량의 최대값($Q_{p,max}$)에 대한 최대값($Q_{p,max}$)과 최소값($Q_{p,min}$)간의 차이에 대한 비로 표현되며, 0에 가까운 값을 나타낼수록 계산결과치(침투유량)의 변동폭이 작으므로 계산결과치에 주는 민감도가 작음을 의미한다(식 8, 9).

$$S_Q = (Q_{p,max} - Q_{p,min}) / Q_{p,max} \quad (8)$$

$$= 1 - (Q_{p,min} / Q_{p,max}) \quad (9)$$

4.1 강우규모에 따른 민감도분석

강우규모의 조건을 재현기간 5~30년으로 변화시킴에 따른 주요매개변수의 민감도 변화를 분석하였다. 그림 4, 5에서 가로축은 최적 매개변수 값을 기준으로 최대 50%에서 최소 -50%까지의 범위내에서 매개변수의 변화율을 나타내며, Q_{pr} 은 매개변수값의 변화에 따른

침투유출량의 변화율을 나타낸다.

이 결과에서 보여주는 바와 같이 일반적으로 불투수 지역 면적비, 초기침투능, 관로경사, 관로 조도계수 등의 민감도가 큰 것으로 나타났다. 또한, 강우규모가 클수록 우수관로 관련 매개변수가, 반대로 강우규모가 작을수록 초기침투능, 불투수면적비 등의 지표면 유출 관련 매개변수가 민감한 것으로 나타났다.

특히, 매개변수, 배수구역 폭은 환경사유역인 Kings Creek, Gray Haven 배수구역에서 강우규모에 보다 민감한 것으로 나타났으며, 이는 강우강도와 배수구역 폭이 도달시간에 주는 영향이 급경사의 경우보다 민감한 것에 기인하는 것으로 보여진다. 또한, 매개변수, 초기 침투능의 경우 침투율이 큰 토양으로 구성(A, B형 혼합)된 지역인 남가좌유역에서 타 유역보다 민감도가 크게 나타났다(그림 2와 3, 표 6).

4.2 강우지속시간에 따른 민감도분석

강우지속시간 30분, 1, 2, 3 시간 등의 조건에서 주요 매개변수들이 결과치에 주는 민감도를 분석한 결과 불투수면적비, 관로경사, 관 조도계수 등의 순서로 계산 결과치, 침투유량에 주는 민감도가 크게 나타났으며, 지속시간이 짧아 강우의 집중도가 클수록 관로의 경사 및 관 조도계수의 민감도가 크게 증가하는 경향을 나타냈다.

한편, 강우지속시간에 따른 민감도분석의 경우에서도 배수구역 폭의 경우 유역경사조건에 따라 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있었으며, 이는 유역경사가 침투유출량에 주요변수인 도달시간에 미치는 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 타 유역에 비하여 침투성이 큰 토양으로 구성된 남가좌유역에서는 초기침투능의 변화에 따른 민감도가 크게 나타났다(그림 4와 5, 표 7).

4.3 강우분포에 따른 민감도분석

강우분포의 변화에 따른 민감도 분석결과 전반적으로 불투수면적비, 관로경사가 계산결과치에 주는 민감도가 큰 것으로 나타났다.

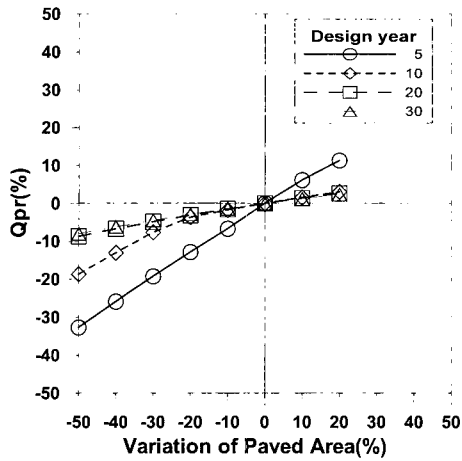


그림 2. 강우규모와 불투수면적비의 민감도(남가좌 유역)

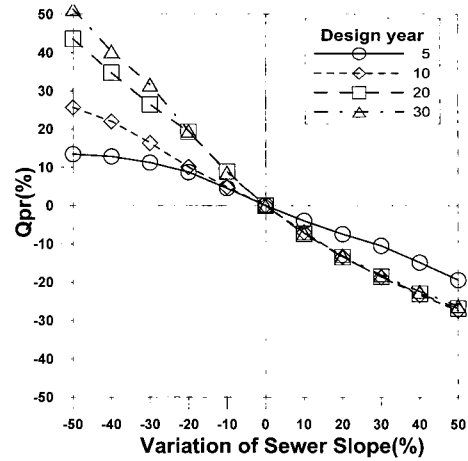


그림 3. 강우규모와 관로경사의 민감도 (Kings Creek 유역)

표 6. 강우규모에 따른 주요 매개변수 민감도, S_Q 의 비교(강우 : 1시간 / Huff 2)

매개변수		남가좌 배수구역				Kings Creek 배수구역				Gray Haven 배수구역				
		5년	10년	20년	30년	5년	10년	20년	30년	5년	10년	20년	30년	
유효 강우량	지면 저류	불투수	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		투수	0.008	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	0.008	0.005	0.001	0.000
	초기침투능	0.234	0.175	0.187	0.188	0.187	0.109	0.045	0.042	0.284	0.217	0.036	0.036	
지표면 유출	배수구역 폭		0.089	0.065	0.086	0.097	0.111	0.031	0.015	0.015	0.150	0.143	0.026	0.028
	불투수면적비		0.421	0.231	0.131	0.122	0.111	0.102	0.037	0.035	0.452	0.333	0.148	0.077
	유역경사		0.047	0.032	0.043	0.049	0.057	0.015	0.007	0.007	0.075	0.073	0.012	0.013
	조도 계수	불투수	0.025	0.002	0.002	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.007	0.006	0.001	0.001
		투수	0.058	0.066	0.089	0.102	0.117	0.023	0.011	0.010	0.128	0.119	0.023	0.025
관로	관로 길이		0.008	0.003	0.004	0.004	0.004	0.014	0.001	0.001	0.007	0.006	0.001	0.001
	관로 조도		0.107	0.210	0.214	0.200	0.184	0.301	0.349	0.345	0.003	0.179	0.313	0.343
	관로경사		0.135	0.232	0.290	0.313	0.336	0.422	0.490	0.512	0.010	0.217	0.343	0.395

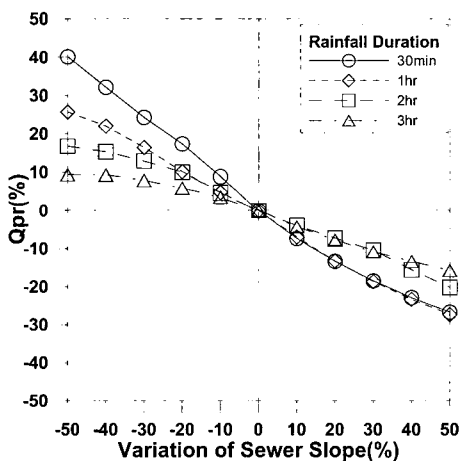


그림 4. 강우지속시간과 관로경사의 민감도(Kings Creek 유역)

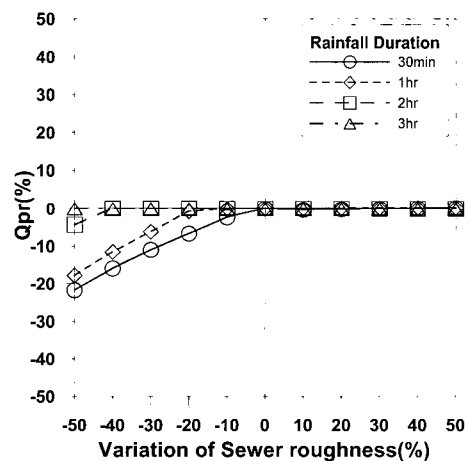


그림 5. 강우지속시간과 관조도 계수의 민감도(Gray Haven 유역)

표 7. 강우지속시간에 따른 민감도, S_Q 의 비교(강우 : 10년 / Huff 2)

매개변수			남가좌 배수구역				Kings Creek 배수구역				Gray Haven 배수구역			
			30분	1시간	2시간	3시간	30분	1시간	2시간	3시간	30분	1시간	2시간	3시간
유효 강우량	지면 저류	불투수	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		투수	0.005	0.003	0.005	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	0.010	0.005	0.002	0.001
	초기침투능	0.133	0.175	0.299	0.331	0.058	0.109	0.117	0.096	0.136	0.217	0.223	0.183	
지표면 유출	배수구역 폭		0.116	0.065	0.080	0.085	0.032	0.031	0.013	0.007	0.187	0.143	0.094	0.065
	불투수면적비		0.233	0.231	0.249	0.180	0.089	0.102	0.096	0.076	0.368	0.334	0.260	0.184
	지표면경사		0.057	0.032	0.040	0.043	0.013	0.015	0.005	0.003	0.102	0.073	0.045	0.030
	조도 계수	불투수	0.030	0.002	0.005	0.005	0.001	0.000	0.001	0.000	0.056	0.006	0.005	0.003
		투수	0.078	0.066	0.083	0.089	0.020	0.023	0.009	0.005	0.094	0.119	0.080	0.052
관로	관로 길이		0.009	0.003	0.003	0.003	0.008	0.014	0.003	0.002	0.019	0.006	0.001	0.001
	관로 조도		0.222	0.210	0.110	0.040	0.339	0.301	0.233	0.176	0.218	0.179	0.044	0.000
	관로경사		0.315	0.232	0.136	0.069	0.477	0.422	0.316	0.229	0.260	0.217	0.088	0.001

불투수면적비의 경우에는 Huff 1분위에서 민감하였 으며, 관로경사는 Huff 4분위에서 가장 민감하게 반응

하였다(그림 6과 7, 표 8).

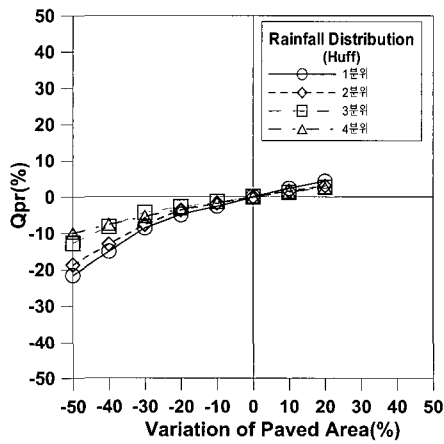


그림 6. 강우분포와 불투수면적비의 민감도(남가좌 유역)

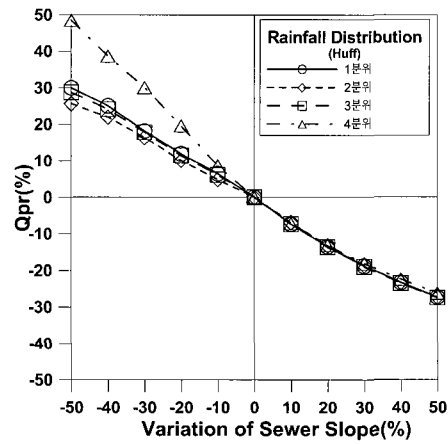


그림 7. 강우분포와 관로경사의 민감도(Kings Creek 유역)

표 8. 강우분포(Huff)에 따른 민감도, S_Q 의 비교(강우 : 10년 / 1시간)

매개변수			남가좌 배수구역				Kings Creek 배수구역				Gray Haven 배수구역			
			1분위	2분위	3분위	4분위	1분위	2분위	3분위	4분위	1분위	2분위	3분위	4분위
유효 강우량	지면 저류	불투수	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		투수	0.004	0.003	0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.006	0.005	0.004	0.001
	초기침투능	0.144	0.175	0.180	0.168	0.098	0.109	0.077	0.034	0.199	0.217	0.181	0.046	
지표면 유출	배수구역 폭		0.081	0.065	0.071	0.113	0.029	0.032	0.019	0.012	0.170	0.143	0.133	0.044
	불투수면적비		0.273	0.231	0.172	0.141	0.126	0.102	0.068	0.023	0.364	0.334	0.268	0.144
	지표면경사		0.042	0.032	0.035	0.057	0.015	0.015	0.008	0.005	0.087	0.073	0.064	0.020
	조도 계수	불투수	0.022	0.002	0.003	0.011	0.005	0.001	0.002	0.000	0.024	0.006	0.004	0.007
		투수	0.061	0.066	0.075	0.100	0.021	0.023	0.012	0.008	0.123	0.119	0.101	0.029
관로	관로 길이		0.006	0.003	0.003	0.007	0.018	0.014	0.007	0.000	0.006	0.006	0.002	0.001
	관로 조도		0.240	0.210	0.226	0.207	0.313	0.301	0.311	0.345	0.188	0.179	0.207	0.322
	관로경사		0.273	0.232	0.248	0.320	0.441	0.421	0.437	0.503	0.225	0.216	0.242	0.355

5. 비교 고찰

5.1 강우조건에 따른 민감도 분석 결과

강우조건의 변화에 따라 계산결과치에 영향을 미치는 주요매개변수 민감도의 경향성을 종합하여 정리하면 다음과 같다.

(1) SWMM모형은 적용 배수구역에 따라 차이는 있으나 강우규모에 따라 불투수면적비, 침투능, 조도계수, 관 경사, 관 조도계수 등의 매개변수들에 의한 영향을 일반적으로 크게 받음을 알 수 있었다. 특히 강우규모가 커짐에 따라 관로 조도계수 및 관로경사가 상대적으로 타 매개변수들 보다 민감함을 알 수 있었다.

이는 강우규모가 커짐에 따라 홍수추적 과정에서 유효강우량의 변화와 이에 따른 수심의 증감이 침투 유출량의 크기에 미치는 영향이 증대되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 강우규모가 큰 조건에서 유출분석을 할 경우에는 관거 관련 매개변수들의 선정에 더욱 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다(표 9).

(2) 강우지속시간이 길어짐에 따라 전반적으로 주요 매개변수들의 민감도는 둔화되는 경향을 보였다. 이는 모의 초기시 산정된 유효우량의 영향이 강우지속시간이 경과됨에 따라 낮아짐으로써 침투유출량에 미치는 영향

이 둔화되기 때문으로 판단된다. 따라서 강우의 지속시간이 짧을 경우에는 보다 세심한 매개변수의 선정 및 적용이 필요할 것이다(표 9).

(3) 한편, 강우분포에 따른 민감도 분석에 있어서는 불투수면적비, 관로 조도계수, 관로경사 등의 매개변수의 민감도가 크게 나타났다. Huff 1분위에서는 불투수면적비가, 4분위에서는 관로경사의 민감도가 큼을 알 수 있었다. 그러나 초기침투능 및 관조도계수의 경우에는 배수구역에 따라 상이한 결과를 보였다(표 10).

(4) 불투수면적비, 관로경사는 강우규모, 지속시간, 분포형 등의 모든 경우에서 매우 큰 민감도를 보여주었다.

(5) 배수구역 폭과 초기침투능 등 유역에 관하여서는 유역경사가 급하고 침투율이 큰 토양형의 남가좌 유역과 타 유역과는 상이한 민감도를 나타내고 있었으며 이는 유역경사, 토양형 등의 유역특성 인자의 차이에 의한 것으로 판단된다.

5.2 기존 연구성과와의 비교

SWMM 모형에 대한 기존의 민감도분석 연구로서 국내에서 강태호와 이종태(1998), 서규우(1998), 채석준과 이정규(2000) 등, 그리고, 국외에서 Nix (1994) 등이 제시한 기존 연구들과 결과 비교 검토를 실시하였다(표 11).

표 9. 강우규모, 지속시간과 주요매개변수 민감도의 변화

적용성 평가기준		불투수면적비	초기 침투능	지면저류		배수 구역폭	지표면 경사	조도계수		관로 길이	관로경사	관로 조도계수
				불투수	투수			불투수	투수			
강우규모 (5년→30년)	남가좌	▼	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	-
	Kings Creek	-	▼	-	-	-	-	-	▼	-	▲	▲
	Gray Haven	▼	▼	-	-	▼	-	-	▼	-	▲	▲
강우 지속시간 (30분→3시간)	남가좌	-	▲	-	-	-	-	-	-	-	▼	▼
	Kings Creek	-	-	-	-	-	-	-	-	-	▼	▼
	Gray Haven	▼	-	-	-	▼	-	-	-	-	▼	▼

주) ▲, ▼ : S_Q 의 변화량(증, 감/최대 S_Q 와 최소 S_Q 의 차이)이 |0.1| 이상 / - : S_Q 의 변화량(증, 감)이 |0.1| 미만

표 10. 강우분포에 따른 민감도 분석결과

Huff 분포	불투수면적비			배수구역폭			관로경사			불투수 조도계수			관조도계수			초기침투능		
	남가좌	Kings Creek	Gray Haven	남가좌	Kings Creek	Gray Haven	남가좌	Kings Creek	Gray Haven	남가좌	Kings Creek	Gray Haven	남가좌	Kings Creek	Gray Haven	남가좌	Kings Creek	Gray Haven
1분위	●	●	●			●				●	●	●	●			○		
2분위				○	●		○	○	○	○				○	○		●	●
3분위												○				●		
4분위	○	○	○	●	○	○	●	●	●		○		○	●	●		○	○

주) ● : 민감도가 4가지 분포중에서 가장 높음 / ○ : 가장 낮음

표 11. 기존 연구성과 비교·검토

구분	민감도비	매개변수	민감도순위	적용강우조건
금회	$S_Q = 1 - (Q_{pmin}/Q_{pmax})$	11개	· 불투수면적비 · 관 조도계수 · 배수구역 폭 · 관로경사 · 초기 침투능	· 강우규모 · 강우지속시간 · 강우분포
강태호(1998)	Q_{pr}/Q_{po} , Q_{po} : 기준침투유량	5개	· 불투수면적비 · 관 조도계수	· 실측우량
서규우(1998)	$S_{PR} = (Q_{pmin}/Q_{pmax})$	6개	· 침투능	· 강우지속시간 · 강우분포
채석준, 이정규(2000)	$S_{PR} = (Q_{pmin}/Q_{pmax})$	6개	· 침투능	· 강우지속시간 · 강우분포
Nix, S. J. (1994)	Q_{pr}/Q_{po} , Q_{po} : 기준침투유량	5개	· 불투수면적비 · 배수구역 폭 · 관 조도계수	· 실측우량

강태호 등(1998)은 서울 남가좌 배수구역에 대하여 불투수면적비, 유역폭, 관조도계수, 지표면 조도계수, 지면저류 등 5개 주요매개변수에 대하여 실측강우를 중심으로 최적도의 유출량에 대한 변경된 유역특성인자에 의하여 산정된 침투유출량 비로 민감도분석을 실시하였으며, 그 결과 불투수면적비의 민감도가 가장 크게 나타났으며, 그 외의 매개변수들은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

서규우(1998), 채석준과 이정규(2000) 등은 초기침투능, 중기침투능, 지표면 저류(투수/불투수), 지표면 조도계수(투수/불투수) 등 6개 주요 매개변수에 대하여 강우의 분포와 지속시간에 따른 최대유출량에 대한 최소 유출량 비로 민감도를 분석하였으며, 침투능에서 가장 민감하게 반응하였으며, 조도계수는 조건에 관계없이 거의 일정함을 나타냈다. 또한, 침투능의 민감도는 지속시간이 길어지고 유역면적이 작을수록 증가하는 것으로 분석되었다.

한편, Nix (1994)는 미국 시카고에 위치한 Oakdale Avenue 배수구역을 중심으로 실측강우를 통한 민감도 분석을 실시하였으며, 그 결과 침투유출량에 대하여 불투수면적비, 관 조도계수, 배수구역 폭 순으로 민감하게 나타났다. 개발 정도가 매우 높은 도심지역에서는 침투능의 효과가 그리 크지 않음을 알 수 있었으며, 지면저류 및 조도계수에 대해서도 그 영향이 극히 작은 것으로 분석되었다.

기존의 연구와는 그 분석 방법에 있어서 민감도비의 산정방법과 적용강우조건 등에서 상이한 점을 보이고 있으나, 결과에 있어서는 매우 유사한 점을 나타내고 있었으며, 특히 불투수면적비와 침투능의 민감도가 큰 점은 일치되는 결과를 나타내고 있었다. 또한, 강우의 지속시간이 길어짐에 따라 침투능의 민감도가 증가하는

경향성은 전 유역에서 동일하게 나타나고 있었고, 지표면 저류도 민감도는 그리 크지 않았지만 비슷한 경향성을 나타냈다. 지표면 조도계수의 경우도 배수구역의 특성과 강우의 조건에 상관없이 거의 유사한 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

기존 연구성과와의 상이한 점으로서는, 강태호 등(1998)의 경우 실측강우를 통한 매개변수의 민감도 분석 결과에서는 불투수면적비 이외의 매개변수들의 민감도는 그리 크지 않은 것으로 분석하였는바, 이는 적용하였던 강우의 규모가 매우 작은 것에 기인한 것으로 판단된다.

서규우(1998) 및 채석준, 이정규(2000)의 경우 지형자료나 관련도면 및 관거제원 등을 통하여 비교적 매개변수 산출이 용이한 값을 제외한 침투능, 조도계수, 지면저류를 위주로 민감도를 분석하였으며, 침투능의 민감도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 그러나 실제 모형의 침투유출량에 크게 영향을 미치는 불투수면적비나 관로경사 등에 대한 면밀한 분석결과는 제시되지 않았다.

한편, Nix (1994)의 경우 또한 실측강우를 통한 매개변수 민감도를 수행하였으며, 한 배수구역에서 하나의 실측 강우에 대하여 민감도를 분석한 결과를 제시하였으며, 다른 연구 결과와 비슷한 경향은 나타내고 있으나 다양한 강우조건과 유역조건에 대한 비교 검토결과는 제시되지 않았다.

결국, 이번 연구결과는 기존 연구성과들과 더불어 불확실성을 갖는 매개변수에 대하여 다양한 조건에서 민감도를 분석함으로써 배수구역과 강우를 포함한 상이한 설계조건에 접하게 되는 실무에서 SWMM 모형의 적용성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

6. 결 론

이 연구에서는 강우특성변화가 SWMM모형의 주요 매개변수들의 민감도에 미치는 영향을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 불투수면적비, 관로경사는 강우규모, 지속시간, 분포형 등에 따라 전반적으로 모형의 계산결과치에 민감하게 영향을 주는 것으로 분석되었다.
- (2) 강우규모가 작을수록 지표면 유출 관련 매개변수가 민감하였고, 강우규모가 클수록 관로 조도계수 등 우수관로 관련 매개변수들의 민감도가 큰 경향을 보였다. 이는 시간별 유효강우량의 크기에 따른 지표면 및 관로에서 발생하는 수리현상의 영향에 기인하는 것으로 판단된다.
- (3) 강우지속시간이 길수록 주요 매개변수들의 민감도는 둔화되어 초기침투능을 제외한 지표면 유출 및 우수관로 관련 매개변수 값의 민감도가 작아지는 것으로 나타났다. 이는 강우 집중도의 완화에 따른 수리수심의 저하에 기인하는 것으로 판단된다.
- (4) 강우분포에 따른 민감도 분석결과, Huff 분포형에서는 전반적으로 불투수면적비의 경우는 1분위에서, 우수관로 관련 매개변수는 4분위에서 보다 민감함을 나타내었다.
- (5) 강우조건에 따른 민감도는 검토 배수구역에서 대체로 유사한 결과를 나타내고 있으나, 일부 상이한 결과는 유역경사, 토양형 등의 특성에 따른 영향으로 판단되어 이에 관한 추가 검토가 요망된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과물로서 관계당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강태호, 이종태 (1998). “도시유역에서의 최적 유출·수질매개변수 결정과 특성 연구”. **한국수자원학회 학술발표회 논문집** 98, 한국수자원학회, pp 171~176
- 강태호, 이재준, 이종태 (1999). “도시하천에서의 강우 유출 및 수질예측(I),(II)”, **한국토목학회 논문집** 19(II-1), 대한토목학회, pp 23~45
- 서규우, 조원철, 허준행 (1998). “유역특성 변화에 따른 도시유출모형의 매개변수 민감도분석(I),(II)”, **한국수자원학회 논문집** 31(3), 한국수자원학회, pp 243~267
- 이종태, 강태호, 김정환 (1996). “도시유역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM모형”, **제4회 수공학익삼교재**, 한국수자원학회, pp 97~204
- 이종태, 최성열, 김문모 (2004). **도시하천 유출해석모형의 특성비교**, FFC03-01, 도시홍수재해관리기술연구사업단, pp 217
- 조현경, 이순탁 (1996). “SED 강우-유출 모델에서의 매개변수 추정”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집** 1996, 한국수자원학회, pp 369~374
- 채석준, 이정규 (2000). “강우유출모형을 이용한 도시하천에서의 민감도분석”, **대한토목학회 학술발표회 논문집** 31(3), 대한토목학회, pp 243~267
- 한국수자원학회, 서울특별시 (2002). '01 수해백서, p 3-63
- Crawford, N.H. & Linsley, R.K. (1966). "*Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*", Tech. Report No.39, Stanford University.
- Maksimovic, C. & M. Radojkovic (1986). *Urban Drainage Catchment*, Great Britain by A. Wheaton. Co. Ltd., Exeter, pp. 61~124
- Huber, W.C et al (1988). *Stormwater Management Model Ver.4, Part A : User's Manual*, E.P.A
- Nix, Stephan J. (1994). *Urban Stormwater Modeling and Simulation*, Lewis Publishers, pp. 92~104

(논문번호:04-84/접수:2004.09.08/심사완료:2005.02.22)