

# 모형매개변수의 민감도분석을 통한 도시구역 유출영향 분석

The Runoff Effect Analysis by Sensitivity Analysis of Model Parameters  
in Urban Watershed

○서규우\*, 허준행\*\*, 조원철\*\*\*

## 1. 서론

산업화와 도시화의 지속적인 진전으로 도시근교의 경우 부족한 택지와 상업지구의 개발을 위해 하천하류부에서의 대규모 개발이 시행되면서 이로 인한 주변지역의 재해위험성이 더욱 증가되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 대규모 택지개발에 적용할 수 있는 도시유출모형으로 CHICAGO 수문곡선법, RRL 방법, ILLUDAS 모형, SWMM 모형을 소개하고 각 모형의 적용을 위해 실제 도시화가 진행되면서 대규모 택지가 개발되고 있는 대표유역을 선정하여 실측자료에 의한 모형의 주요 매개변수에 대한 검정 및 검증 실시하고 유출에 영향을 크게 미치는 모형별 주요 매개변수를 선정하여 본 연구에서 제안한 무차원값을 이용하여 상대적인 민감도분석을 실시하고 이 분석결과를 도시구역의 유출영향분석에 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 모형의 검정 및 검증

도시구역에서의 수문학적 관심은 배수관거의 설계, 유역의 배수문제, 우수지 용량 결정과 펌프용량 등의 결정 등이다. 이를 위해 우선적으로 분석해야 하는 기본자료 중의 하나가 해당유역에서의 침투유량이나 총유출량의 크기이며 침투유량 발생시각 등이다. 본 절에서는 개발면적 약 100ha로 대규모 택지개발이 이루어진 유역을 대상으로 4가지 유출모형에 대한 검정 및 검증결과로 산정된 총유출량과 침투유량, 침투유량 발생시각을 중심으로 실측치와 종합적으로 비교분석을 하기로 한다.

대상유역에서의 각 모형별로 적용시킨 검정 및 검증결과를 유출수문곡선으로 나타내면 다음 그림 1~2와 같다.

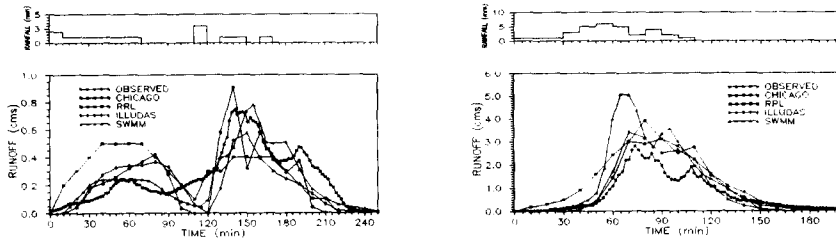


그림 1. 모형별 검정결과(96년 6월 27일)    그림 2. 모형별 검증결과(96년 7월 15일)

\* 연세대학교 토목공학과 박사과정수료  
\*\* 연세대학교 토목공학과 조교수  
\*\*\* 연세대학교 토목공학과 교수

### 3. 모형매개변수의 민감도분석

각 모형별로 중요한 매개변수들을 선정하고 이들 매개변수의 변화에 따른 유출해석을 실시하여 각 매개변수가 모형 모의결과에 미치는 영향을 강우지속시간별, 강우분포형별 등에 대해 식 (1)~식 (3)과 같이 총유출량비( $Q_{TR}$ )와 침투유출량비( $Q_{PR}$ )와 총유출량비를 침투유출량비로 나눈 비( $Q_{TR}/Q_{PR}$ )로 나타낼 수 있는 유출민감도비( $Q_{SR}$ )와 같은 무차원값을 정의하고 매개변수간의 상대적인 민감도 정도를 분석하고자 한다.

$$\text{총유출량비}(Q_{TR}) = \frac{\text{해당단계의 총유출량}}{\text{최대총유출량}} \quad (1)$$

$$\text{침투유출량비}(Q_{PR}) = \frac{\text{해당단계의 침투유출량}}{\text{최대침투유출량}} \quad (2)$$

$$\text{유출민감도비}(Q_{SR}) = \frac{\text{총유출량비}(Q_{TR})}{\text{침투유출량비}(Q_{PR})} \quad (3)$$

CHICAGO 수문곡선법에서는 유효우량결정을 위한 침투능(CI)선정과 전체유역에 대한 도시화정도를 나타내는 지표면의 포장율(CP)결정과 포장유역과 비포장유역에서의 손실량으로 나타나는 저류깊이(CS) 등이 주요 매개변수이고, RRL 방법에서는 유출계수(RR)의 선정으로 유출률이 결정되고 총유출량의 변화와 침투유출량의 변화정도가 똑같이 나타나며, ILLUDAS 모형에서는 매개변수들 중에서 유출해석에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소로는 손실량(II)의 가정과 유역의 토양형(IS)결정, 선행토양함수량(IA)선정 등이다. SWMM 모형의 경우 본 연구에서 적용한 모형중 가장 많은 입력 자료를 준비해야 하는 모형으로, 침투능(SI)과 조도계수(SR), 그리고 손실저류깊이(SS) 등이 유출량에 영향을 많이 미치는 매개변수들이다. 각 모형별 주요 매개변수의 분석된 적정 변화단계를 보면 다음 표 1~4와 같다.

표 1. CHICAGO 수문곡선법의 매개변수

단계	침투능(CI)		포장율(CP,%)	저류깊이(CS)	
	투수지역(in)	불투수지역(in)		투수지역(in)	불투수지역(in)
1	10.0	1.00	50	0.40	0.18
2	9.0	0.75	55	0.35	0.14
3	8.0	0.50	60	0.30	0.12
4	7.0	0.40	65	0.25	0.10
5	6.0	0.32	70	0.20	0.08
6	5.0	0.25	75	0.15	0.06
7	4.0	0.17	80	0.10	0.04
8	3.0	0.10	85	0.05	0.02

표 2. ILLUDAS 모형의 매개변수

단계	손실량(II)		선행토양함수량(IA)	토양형(IS)
	녹지지역(mm)	포장지역(mm)		
1	8.0	4.00	1	1
2	7.0	3.50		
3	6.0	3.00	2	2
4	5.0	2.50		
5	4.0	2.00	3	3
6	3.0	1.50		
7	2.0	1.00	4	4
8	1.0	0.50		

표 3. SWMM 모형의 매개변수

단계	침투능(SI)		조도계수(SR)		손실저류깊이(SS)		단계	유출계수(RR)
	초기(mm/hr)	중기(mm/hr)	투수지역	불투수지역	투수지역(mm)	불투수지역(mm)		
1	254.0	25.4	0.09	0.018	8.0	4.00	1	0.55
2	228.0	19.05	0.08	0.017	7.0	3.50	2	0.60
3	203.2	12.70	0.07	0.016	6.0	3.00	3	0.65
4	177.8	10.16	0.06	0.015	5.0	2.50	4	0.70
5	152.4	8.13	0.05	0.014	4.0	2.00	5	0.75
6	127.0	6.35	0.04	0.013	3.0	1.50	6	0.80
7	101.6	4.32	0.03	0.012	2.0	1.00	7	0.85
8	76.20	2.54	0.02	0.011	1.0	0.50	8	0.90

표 3. RRL 방법의 매개변수

#### 4. 민감도분석의 결과

각 모형에 대해 상대적으로 유역면적이 큰 동수천 대표유역(460ha)과 유역면적이 작은 무심천 대표유역(100ha)에 대해 Huff의 강우분포형과 60분, 120분, 180분 강우지속기간별로 선정된 매개변수의 민감도분석결과를 바탕으로 유출량비율 산정결과를 정리하면 다음 표 5~8과 같다.

표 5. CHICAGO 수문곡선법의 매개변수별 유출량비율 산정결과

강우분포	지속기간	대표유역	민감도	침투능(CI)	포장율(CP)	저류깊이(CS)
Huff 1	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.800	0.714	0.914
			Q <sub>PR</sub>	0.795	0.618	0.908
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.737	0.824	0.887
			Q <sub>PR</sub>	0.769	0.825	0.897
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.767	0.773	0.936
			Q <sub>PR</sub>	0.781	0.599	0.901
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.711	0.829	0.910
			Q <sub>PR</sub>	0.866	0.733	0.818
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.757	0.778	0.943
			Q <sub>PR</sub>	0.825	0.630	0.909
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.705	0.818	0.921
			Q <sub>PR</sub>	0.881	0.734	0.849
Huff 2	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.800	0.710	0.910
			Q <sub>PR</sub>	0.690	0.670	0.880
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.735	0.828	0.886
			Q <sub>PR</sub>	0.712	0.863	0.913
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.770	0.780	0.940
			Q <sub>PR</sub>	0.680	0.860	0.960
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.709	0.840	0.910
			Q <sub>PR</sub>	0.632	0.920	0.961
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.770	0.790	0.940
			Q <sub>PR</sub>	0.690	0.870	0.950
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.703	0.831	0.919
			Q <sub>PR</sub>	0.632	0.920	0.967
Huff 3	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.791	0.730	0.908
			Q <sub>PR</sub>	0.707	0.723	0.910
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.729	0.835	0.888
			Q <sub>PR</sub>	0.680	0.895	0.927
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.783	0.789	0.933
			Q <sub>PR</sub>	0.684	0.881	0.953
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.705	0.842	0.912
			Q <sub>PR</sub>	0.633	0.926	0.961
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.776	0.803	0.945
			Q <sub>PR</sub>	0.712	0.910	0.976
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.759	0.881	0.945
			Q <sub>PR</sub>	0.843	0.980	0.987
Huff 4	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.812	0.730	0.907
			Q <sub>PR</sub>	0.684	0.770	0.918
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.738	0.830	0.886
			Q <sub>PR</sub>	0.655	0.880	0.945
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.799	0.787	0.934
			Q <sub>PR</sub>	0.791	0.955	0.992
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.709	0.837	0.910
			Q <sub>PR</sub>	0.632	0.955	0.988
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.798	0.803	0.944
			Q <sub>PR</sub>	0.800	0.960	0.998
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.713	0.831	0.921
			Q <sub>PR</sub>	0.654	0.948	0.994

표 6. ILLUDAS 모형의 매개변수별 유출량비율 산정결과

강우분포	지속기간	대표유역	민감도	손실량(II)	선행토양 함수량(IA)	토양형(IS)
Huff 1	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.904	0.454	0.518
			Q <sub>PR</sub>	0.919	0.443	0.530
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.917	0.536	0.690
			Q <sub>PR</sub>	0.917	0.566	0.654
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.936	0.571	0.497
			Q <sub>PR</sub>	0.937	0.548	0.512
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.936	0.461	0.729
			Q <sub>PR</sub>	0.966	0.484	0.609
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.943	0.619	0.438
			Q <sub>PR</sub>	0.936	0.533	0.483
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.943	0.404	0.757
			Q <sub>PR</sub>	0.865	0.423	0.554
Huff 2	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.900	0.500	0.570
			Q <sub>PR</sub>	0.920	0.560	0.630
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.911	0.605	0.707
			Q <sub>PR</sub>	0.964	0.642	0.758
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.930	0.590	0.560
			Q <sub>PR</sub>	0.940	0.590	0.580
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.934	0.537	0.735
			Q <sub>PR</sub>	0.998	0.620	0.824
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.940	0.630	0.520
			Q <sub>PR</sub>	0.970	0.690	0.590
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.942	0.489	0.759
			Q <sub>PR</sub>	0.996	0.581	0.877
Huff 3	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.908	0.518	0.577
			Q <sub>PR</sub>	0.917	0.545	0.603
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.919	0.598	0.712
			Q <sub>PR</sub>	0.992	0.677	0.806
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.936	0.608	0.561
			Q <sub>PR</sub>	0.971	0.613	0.587
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.936	0.540	0.743
			Q <sub>PR</sub>	0.999	0.649	0.880
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.944	0.657	0.524
			Q <sub>PR</sub>	0.985	0.766	0.617
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.959	0.634	0.834
			Q <sub>PR</sub>	0.999	0.918	0.993
Huff 4	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.904	0.526	0.572
			Q <sub>PR</sub>	0.923	0.546	0.591
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.917	0.597	0.707
			Q <sub>PR</sub>	0.993	0.675	0.813
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.935	0.606	0.562
			Q <sub>PR</sub>	0.984	0.644	0.602
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.936	0.555	0.735
			Q <sub>PR</sub>	0.998	0.737	0.824
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.944	0.661	0.532
			Q <sub>PR</sub>	0.995	0.801	0.642
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.943	0.520	0.768
			Q <sub>PR</sub>	0.999	0.729	0.984

표 7. RRL 방법에서의 매개변수 유출량비율 산정결과

강우분포	지속기간	대표유역	민감도	유출계수(RR)
Huff 1	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.611
Huff 2			Q <sub>PR</sub>	0.611
Huff 3	120min	무심천	Q <sub>TR</sub>	0.611
Huff 4			Q <sub>PR</sub>	0.611

표 8. SWMM 모형의 매개변수별 유출량비율 산정결과

강우분포	지속기간	대표유역	민감도	침투능(SI)	조도계수(SR)	저류깊이(SS)
Huff 1	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.861	0.976	0.933
			Q <sub>PR</sub>	0.895	0.953	0.947
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.780	0.987	0.912
			Q <sub>PR</sub>	0.908	0.949	0.916
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.816	0.986	0.955
			Q <sub>PR</sub>	0.856	0.949	0.945
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.719	0.990	0.931
			Q <sub>PR</sub>	0.896	0.878	0.892
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.789	0.988	0.961
			Q <sub>PR</sub>	0.862	0.947	0.955
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.697	0.993	0.939
			Q <sub>PR</sub>	0.879	0.921	0.890
Huff 2	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.860	0.970	0.930
			Q <sub>PR</sub>	0.920	0.940	0.960
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.785	0.984	0.909
			Q <sub>PR</sub>	0.868	0.989	0.949
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.840	0.982	0.954
			Q <sub>PR</sub>	0.880	0.967	0.990
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.747	0.992	0.930
			Q <sub>PR</sub>	0.796	0.996	0.963
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.810	0.987	0.960
			Q <sub>PR</sub>	0.850	0.980	0.995
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.705	0.994	0.938
			Q <sub>PR</sub>	0.735	0.998	0.979
Huff 3	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.857	0.976	0.934
			Q <sub>PR</sub>	0.914	0.954	0.976
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.775	0.987	0.913
			Q <sub>PR</sub>	0.846	0.976	0.958
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.828	0.983	0.952
			Q <sub>PR</sub>	0.867	0.973	0.995
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.732	0.990	0.932
			Q <sub>PR</sub>	0.775	0.993	0.976
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.802	0.988	0.958
			Q <sub>PR</sub>	0.841	0.981	0.998
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.689	0.993	0.939
			Q <sub>PR</sub>	0.711	0.997	0.985
Huff 4	60min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.850	0.980	0.928
			Q <sub>PR</sub>	0.906	0.945	0.983
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.760	0.983	0.911
			Q <sub>PR</sub>	0.870	0.971	0.975
	120min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.823	0.982	0.951
			Q <sub>PR</sub>	0.902	0.964	0.998
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.704	0.988	0.931
			Q <sub>PR</sub>	0.808	0.979	0.993
	180min	동수천	Q <sub>TR</sub>	0.781	0.985	0.960
			Q <sub>PR</sub>	0.861	0.973	0.990
		무심천	Q <sub>TR</sub>	0.673	0.989	0.939
			Q <sub>PR</sub>	0.765	0.983	0.998

각 모형별로 분석한 내용중 CHICAGO 수문곡선법, ILLUDAS 모형과 SWMM 모형에 대해 120분 지속기간, Huff 2분위에 대한 매개변수의 민감도분석 결과를 보면 다음 그림 3~6과 같다.

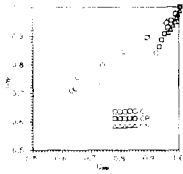


그림 3. CHICAGO

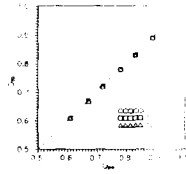


그림 4. RRL

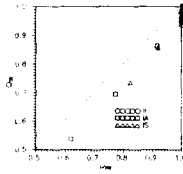


그림 5. ILLUDAS

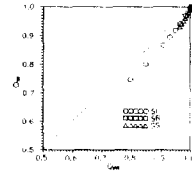


그림 6. SWMM

## 6. 민감도분석 결과활용 및 결론

본 연구에서 적용한 모형의 주요 매개변수의 민감도결과를 중심으로 도시유출모형의 확립과 재해영향평가를 위한 활용방안을 살펴보면 다음과 같다. 모형에서 매개변수의 민감도 결과를 이용하면 재해영향평가에서 개발로 인한 유출증가량을 감소시킬 여러 방안을 정량적으로 분석해 볼 수 있다. 즉 개발로 인한 하류부의 유출영향분석결과의 양상에 따라 즉, 기존에 비해 침투유출량의 변화없이 총유출량만 10%정도 증가한다든지, 아니면 반대로 총유출량의 변화는 거의 없이 침투유출량만 10%정도 증가한다든지, 혹은 총유출량과 침투유출량이 동시에 10%정도 증가한다든지 등의 상황에 따른 저감계획을 매개변수의 조정을 통해 침투능이나 지표면 저류깊이나 손실저류깊이가 어느 정도로 늘게 되면 유출증가량을 10%정도 감소시키는지를 확인하고 이에 대한 대책을 강구할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 4가지 유출모형의 주요 매개변수들에 대해 민감도분석을 실시하여 각 모형의 매개변수들이 갖는 유출특성을 분석하여 차후 유출해석을 위한 모형의 검증이나 검증시 적정 매개변수값을 결정하는데 있어 좀 더 합리적인 방법을 제시할 수 있도록 하였다. 즉 모형매개변수의 민감도정도를 총유출량비( $Q_{TR}$ )와 침투유출량비( $Q_{PR}$ ), 유출민감도비( $Q_{SR}$ )로 구분하여 살펴본 연구결과를 이용하면 재해영향평가 등에서 개발로 인한 유출증가량을 억제시킬 여러 방안을 정량적으로 분석해 볼 수 있는 방법을 제시할 수 있다.

## 참고문헌

- 서규우, 배덕효, 심재현, 이재준(1996a). "유역개발에 따른 도시하천에서의 유출량 및 도달시간변화에 관한 연구", 한국수자원학회지, 제29권 제3호, pp. 207-216.
- 서규우, 허준행, 조원철(1996b). "도시화에 따른 유출영향분석 및 침수저감대책에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제16권 제II-5호.
- 전병호(1989). "도시소규모단지의 우수유출량 산정기법에 관한 연구", 한국토지개발공사.
- 허준행, 서규우(1996). 도시유역 강우-유출모형의 적용 및 비교분석, 한국건설기술연구원.
- Huber, W. C., Dickinson, R. E.(1988). Storm Water Management Model, Ver. 4, Part A; User's Manual, EPA-600/3-88/001a, U. S. EPA.
- Huff, F. A.(1990). "Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois", State of Illinois, Water Survey, ISWS/CIR-173/90, Circular 173.
- Kiber, D. F.(1982). Urban Stormwater Hydrology, AGU, Water Resources Monograph 7, Washington, D. C., pp. 10-12.
- McCuen, R. H.(1973). "The Role of Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling, Journal of Hydrology, Vol. 18, pp. 37-53.
- Terstriep, M.L. and Stall, J. B.(1974). "The Illinois Urban Drainage Area Simulator," ILLUDAS, Bulletin 58, State Wat. Surv., Urbana, Illinois.