

도시화유역에서의 강우특성변화에 따른 유출영향분석

Runoff Effect Analysis due to Variation of Rainfall Characteristics
at Urbanization Watershed

서규우*, ○박문형**, 이동진**, 조원철***

1. 서론

우리나라는 60년대이후 공업화 및 산업화를 계기로 인구의 도시집중화가 진행되었고 이로 인한 시가지의 개발이 가속화되면서, 더 많은 토지가 필요하게 되어 도시근교의 구릉이나 계곡이 절취되고, 전답이 매립되어 주택지 또는 상가가 조성되면서 도시화현상이 급진전되었다. 도시화의 최종단계에서는 하천하류부전체에 대해 대단위 주택단지가 조성되어 더 많은 주택이 들어서고 공공시설, 상업시설, 공장시설 등도 들어서며 도로가 포장되므로 침투는 감소되고 유역에서의 조도감소로 유입시간이 줄어들며 수로망정비에 따라 침투홍수량이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 저지대 전답을 대규모로 개발하여 하류부 전체에 대해 택지를 조성하는 사업이 진행되고 있는 경남 Y지구중 두 유역(A유역, B유역)을 대상으로 장차 이 유역의 개발로 인한 유출영향분석을 강우특성치의 변화에 따라 비교·분석하였다.

본 연구에서는 개발지역에 대해 도시화이후의 수문변화양상 연구를 위한 기본자료를 얻기 위해 개발유역면적과 개발유역형상이 상이하여 도달시간이 서로 다른 2개의 배수유역에 대해 Huff의 4분위법에 의한 강우분포형과 30분, 60분, 120분, 180분의 4가지 강우지속기간 별로 나누고 대표적인 도시유출모형인 ILLUDAS 모형과 SWMM 모형을 적용하여 배수유역별 유출영향분석을 신설 하수관거의 설계빈도인 10년을 포함하여 하류부영향을 고려하기 위해 30년과 하류하천의 계획홍수위 빈도인 100년 등의 6가지의 재현기간에 대해 비교분석하였다.

2. 적용모형의 개요

2.1 ILLUDAS 모형

본 연구에서는 Terstriep과 Stall(1974)에 의해 처음 개발되었고 1984년과 1986년 두차례 개정되어 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 ILLUDAS 모형을 사용하였다. 이 모형은 RRL 모형의 기본개념을 그대로 받아들이면서, 투수유역에 내리는 강우로 인한 유출량을 고려하여 RRL 모형을 수정한 모형으로, 전체유역을 직접연결 포장유역, 간접연결 포장유역, 투수유역 및 유출에 기여하지 않는 유역의 4가지로 구분하여 해석하는 모형이다. 모형의 계산절차를 보면 첫째 전체유역을 몇개의 소유역으로 구분하며, 관의 설치지점 혹은 주요 간선관거의 합류지점을 기준으로 하여 소유역을 구분하고, 각 소유역별로 포장유역과 투수유역의 유출량을 계산하여 수문곡선을 합성함으로써 소유역별 유출수문곡선을 구하며, 이를 관로를 통해 추적 합성하여 유역말단부에서의 총 유출수문곡선을 구하게 된다.

* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료

** 연세대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*** 연세대학교 토목공학과 교수

2.2 SWMM 모형

도시유역에서의 강우로 인한 홍수량을 산정하는 모형중 SWMM(Storm Water Management Model)모형은 1971년 미국 EPA의 지원으로 Florida 대학 및 W.R.E.와의 공동 연구로 도시유역 하수시스템내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발하였다. SWMM 모형은 도시유역내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. SWMM 모형은 특히 인위적 배수관거를 갖고 있는 도시소유역에 잘 적용이 된다. 모형의 특성을 살펴보면, 우선 시간적 특성에서 단일강우나 연속강우에 대해 계산이 가능하며 강우간격은 임의로 선정할 수 있다. 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의 조절이 가능하다. 공간적 특성을 보면, 소 배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하다. 배수유역의 합성 및 분리가 가능하며 유출현상은 강우와 융설로 발생하는 것으로 보며 지표면유출은 비선형 저류방정식을 사용한다. 침투량산정은 Horton 또는 Green-Ampt 식을 사용한다. 수로/관로에 대해 RUNOFF 블록은 비선형저류방정식을, TRANSPORT 블록은 Kinematic 방정식을, EXTRAN 블록은 Dynamic 방정식과 연속방정식을 사용한다. 저류추적방법은 수표면이 평행하다고 가정한 수정 Pulse 방법을 사용한다.

3. 적용유역 특성자료

3.1 설계강우량의 산정

설계강우량 자료는 대상유역에 가장 가까운 관측지점인 부산지점(1931년~1995년)에 대한 자기유량 강우자료를 이용한 각 지속기간별 최대치를 정리하고 이를 기본자료로 빈도해석과 적합도검사를 통해 적정확률분포형을 선정하여 이에 따른 재현기간(5, 10, 20, 30, 50, 100년)별 설계강우량을 산정하였다. 표 1은 각 지속기간별 설계강우량을 나타내고 있다. 한편 강우의 시간적 분포는 Huff에 의한 4분위법을 사용하여 분포화시켰다.

표 1. 지속기간과 재현기간별 설계강우량산정

재현기간(년)	지속기간							
	30min	1hr	2hr	3hr	6hr	12hr	24hr	
2.	24.7	39.4	55.2	68.7	92.4	122.4	134.4	
3.	31.0	48.7	67.6	83.4	109.2	150.0	163.2	
5.	37.8	58.6	80.6	99.3	135.0	182.4	196.8	
10.	46.3	70.5	96.4	118.2	160.2	225.6	244.8	
20.	54.2	81.4	110.8	135.6	183.0	271.2	295.2	
30.	58.6	87.4	118.8	144.9	195.0	298.8	324.0	
40.	61.6	91.5	124.4	151.5	204.0	318.0	348.0	
50.	64.0	94.6	128.6	156.3	210.6	333.6	364.8	
60.	65.8	97.1	131.8	160.2	216.0	346.8	381.6	
70.	67.3	99.2	134.6	163.5	220.2	358.8	393.6	
80.	68.7	101.0	137.0	166.2	224.4	368.4	405.6	
90.	69.8	102.6	139.2	168.9	227.4	372.0	415.2	
100.	74.4	106.0	145.0	177.0	242.4	409.2	472.8	

3.2 유역현황 및 배수체계

적용유역인 A유역과 B유역의 유역현황 및 배수체계를 보면 다음과 같다. A유역은 유역면적이 293.0ha 이고 개발전에는 경사가 완만한 논밭지역의 녹지상황이었으며 도달시간이 약 45분정도 되는 부채꼴형 유역이고 B유역은 90.57ha로 개발후 토지이용현황을 보면 표 2와 같고 배수체계현황을 간단히 정리하면 표 3과 같다.

4. 모형의 적용

4.1 유출해석결과

표 2. A, B유역의 평균토지이용현황

구분	구성비(%)
주택건설용지 단독주택 관련 시설	35.5
상업업무시설용지 중심상업지구	6.8
공공시설용지 도주광공유유원수	57.7
합계	100.0

표 3. A, B유역의 배수체계현황

구분	A유역	B유역
유역면적	293.00ha	90.57ha
유로연장	3420m	1000m
평균경사	0.022	0.016
토양형	C형	C형
소유역수	99개	99개
배수관거(상류단)	φ 600mm	φ 700mm
배수관거(하류단)	3@□3.5×3.0	2@□3.0×2.0
평균유출계수	0.78	0.76

적용 A, B유역별 강우지속기간과 재현기간에 따른 첨두유출량과 총유출량을 Huff의 4분위로 나누어 ILLUDAS 모형과 SWMM 모형에 적용한 결과중 A유역은 60분 지속기간, B유역은 30분 지속기간에 대해 정리하면 다음 표 5~6과 같다. 같은 재현기간에 대해 강우의 분위별로 두 모형에서 첨두유출량은 Huff의 4분위가 크고 총유출량은 분위별로 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

표 5. A유역의 적용모형별 유출해석결과

지속시간	재현기간	ILLUDAS(60분)				SWMM(60분)			
		Huff 1	Huff 2	Huff 3	Huff 4	Huff 1	Huff 2	Huff 3	Huff 4
5	Qp(cms)	28.925	35.704	36.137	36.466	29.090	41.380	42.330	43.060
	Qt (m³)	151211.	148706.	153466.	150230.	130000.	127000.	131000.	128000.
10	Qp(cms)	35.259	43.894	44.164	44.747	37.030	53.480	53.950	56.260
	Qt (m³)	185181.	182000.	187716.	183897.	163000.	160000.	165000.	160000.
20	Qp(cms)	41.018	51.242	51.490	52.209	45.130	64.610	64.530	68.580
	Qt (m³)	215997.	212286.	219226.	214565.	193000.	189000.	195000.	190000.
30	Qp(cms)	44.181	55.233	55.418	56.213	49.770	70.720	70.350	75.390
	Qt (m³)	232947.	228891.	236398.	231362.	210000.	205000.	212000.	207000.
50	Qp(cms)	47.971	60.024	60.150	60.905	55.380	78.040	77.450	83.700
	Qt (m³)	253375.	248927.	257131.	251625.	230000.	225000.	232000.	227000.
100	Qp(cms)	54.614	68.275	68.140	68.501	65.050	90.630	90.140	98.010
	Qt (m³)	288448.	283271.	292638.	286349.	264000.	259000.	267000.	261000.

표 6. B유역의 적용모형별 유출해석결과

지속시간	재현기간	ILLUDAS(30분)				SWMM(30분)			
		Huff 1	Huff 2	Huff 3	Huff 4	Huff 1	Huff 2	Huff 3	Huff 4
5	Qp(cms)	15.578	18.271	18.287	18.883	14.660	13.800	12.810	17.580
	Qt (m³)	31677.	30975.	32165.	31385.	57300.	55800.	58600.	55500.
10	Qp(cms)	19.143	21.961	22.107	22.634	18.450	17.050	15.780	19.900
	Qt (m³)	39206.	38385.	39888.	38883.	73300.	70100.	71100.	72400.
20	Qp(cms)	21.918	25.108	25.432	25.960	22.130	20.070	18.560	25.530
	Qt (m³)	45900.	44933.	46695.	45543.	88100.	83600.	87000.	84200.
30	Qp(cms)	23.496	26.751	27.091	27.875	24.250	21.740	20.100	27.650
	Qt (m³)	49538.	48545.	50362.	49213.	95300.	91000.	93000.	91900.
50	Qp(cms)	25.332	28.613	29.057	30.090	26.880	23.800	22.010	30.300
	Qt (m³)	53815.	52772.	54565.	53260.	104000.	100000.	103000.	104000.
100	Qp(cms)	28.083	31.452	32.023	33.282	31.810	27.720	25.610	35.260
	Qt (m³)	60147.	59071.	61057.	59676.	124000.	118000.	122000.	120000.

4.2 적용결과와의 비교분석

적용대상유역의 기왕의 강우형태 조사보고서를 보면 Huff의 2분위가 30% 이상이 되고 있어 본 연구에서도 적정 분포형으로 2분위를 선정하였으나 유출결과에서 보듯이 4분위의 첨두유출량이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 강우분포에 따른 유출영향을 파악하고 두 유역의 적정 강우지속기간 선정을 위해 지속기간에 따른 첨두유출량의 변화양상을 Huff 2분위

의 값을 적용하여 모형별로 분석하면 다음 그림 1~4와 같다.

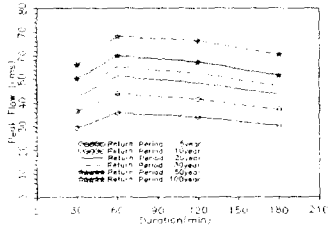


그림 1. ILLUDAS 모형(A유역, Huff 2)

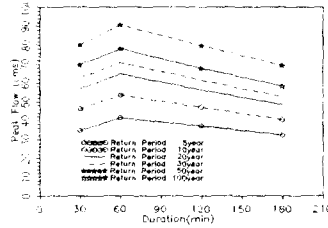


그림 2. SWMM 모형(A유역, Huff 2)

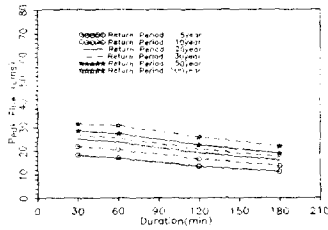


그림 3. ILLUDAS 모형(B유역, Huff 2)

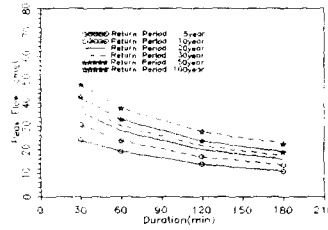


그림 4. SWMM 모형(B유역, Huff 2)

유출결과중 A, B유역에 대해 Huff의 2분위에 대해 지속기간변화에 따른 침투유출량의 최대값이 A유역은 60분에서, B유역은 30분에서 발생하고 있다. 즉 A유역과 B유역의 임계지속기간으로 60분과 30분을 선정할 수 있다. 다음 그림 5~8은 A, B유역의 임계지속기간에 대한 재현기간별 유출수문곡선을 나타낸 것이다. A, B유역 모두 SWMM 모형에 의한 침투유출량이 ILLUDAS 모형의 결과보다 평균적으로 약 15%정도 크게 산정되어 총유출량은 오히려 SWMM 모형의 결과가 조금 적으나 대체적으로는 지속기간, 재현기간, Huff 분위에 대해 거의 비슷하게 나타나고 있어 두 모형의 유출량산정이 적정한 것으로 판단되며 우수시설계나 하류부영향 검토시 설계기준으로 SWMM 모형의 결과를 적용할 경우 안전측면에서 효과적인 것으로 분석되었다.

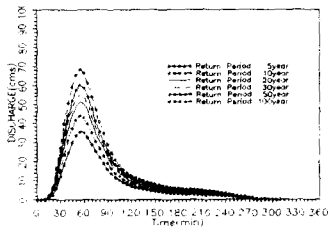


그림 5. 유출수문곡선(ILLUDAS, A유역, 60분)

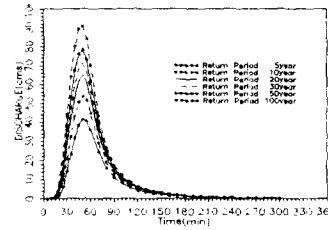


그림 6. 유출수문곡선(SWMM, A유역, 60분)

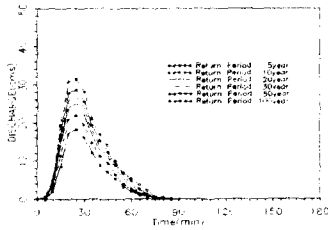


그림 7. 유출수문곡선(ILLUDAS, B유역, 30분)

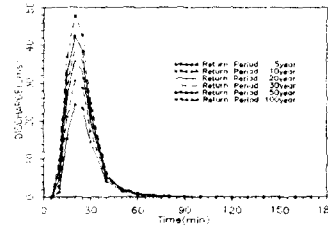


그림 8. 유출수문곡선(SWMM, B유역, 30분)

5. 강우특성변화에 따른 유출영향분석

두 모형에 의한 유출결과에서 A, B유역의 적정 강우분포형으로 선정된 Huff 2분위와 상대적으로 크게 산정된 Huff 4분위의 값을 비교하기 위해 각 지속기간별로 Huff 2분위의 값을 기준으로 4분위에 대한 침투유출량의 크기와 총유출량의 크기비율(%)을 산정하면 A유역과 B유역에서 비슷한 경향을 갖는 것으로 재현기간 10년의 경우 침투유출량의 크기는 지속기간이 증가함에 따라 4.3, 5.2, 12.5, 19.2%로 증가하나 총유출량의 크기는 2%내외에서 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 모형별로 분석하면 다음 표 7~8과 같다.

표 7. 강우분포형과 강우지속기간변화에 따른 유출비율산정 (ILLUDAS)

재현기간	지속시간	A유역				B유역			
		30분	60분	120분	180분	30분	60분	120분	180분
5년	Qp(%)	2.034	4.060	15.135	19.109	3.350	9.134	18.500	22.878
	Qt(%)	0.671	0.787	1.117	1.869	1.324	1.089	0.516	1.178
10년	Qp(%)	4.292	5.198	12.450	19.230	3.065	9.086	11.764	22.017
	Qt(%)	0.893	0.000	2.667	1.493	1.297	1.056	3.688	0.639
20년	Qp(%)	6.053	6.145	15.614	19.449	3.393	9.121	15.902	20.352
	Qt(%)	0.752	0.529	0.000	1.869	1.358	1.176	1.242	0.002
30년	Qp(%)	6.975	6.604	15.785	19.575	4.202	8.819	15.647	19.614
	Qt(%)	0.694	0.976	0.344	1.143	1.376	1.004	1.429	0.734
50년	Qp(%)	7.916	7.253	16.197	19.578	5.162	8.978	15.560	19.478
	Qt(%)	0.637	0.889	2.492	0.515	0.925	1.090	3.593	1.405
100년	Qp(%)	7.154	8.143	16.351	19.789	5.818	9.026	14.472	19.503
	Qt(%)	0.565	0.772	1.592	0.866	1.024	1.231	2.467	2.497

표 8. 강우분포형과 강우지속기간변화에 따른 유출비율산정 (SWMM)

재현기간	지속시간	A유역				B유역			
		30분	60분	120분	180분	30분	60분	120분	180분
5년	Qp(%)	2.034	4.060	15.135	19.109	20.485	23.915	27.391	30.173
	Qt(%)	0.671	0.787	1.117	1.869	2.048	1.471	0.538	0.760
10년	Qp(%)	4.292	5.198	12.450	19.230	18.689	23.859	16.716	29.801
	Qt(%)	0.893	0.000	2.667	1.493	2.452	1.569	3.281	0.362
20년	Qp(%)	6.053	6.145	15.614	19.449	18.220	23.723	27.205	29.620
	Qt(%)	0.752	0.529	0.000	1.869	2.546	1.490	0.718	0.705
30년	Qp(%)	6.975	6.604	15.785	19.575	17.940	23.512	27.185	29.817
	Qt(%)	0.694	0.976	0.344	1.143	2.350	1.527	0.989	0.000
50년	Qp(%)	7.916	7.253	16.197	19.578	17.640	23.009	27.311	29.838
	Qt(%)	0.637	0.889	2.492	0.515	2.554	1.816	4.000	0.833
100년	Qp(%)	7.154	8.143	16.351	19.789	17.250	22.718	27.201	29.929
	Qt(%)	0.565	0.772	1.592	0.866	2.622	1.825	1.695	2.098

표의 결과를 분석하면 두 유역모두에서 공통적으로 나타나는 현상으로 강우지속기간이 증가하면서 Huff 2분위의 침투유출량산정값과 Huff 4분위에서의 절대값이 작아지는 것과 동시에 그 차이를 나타내는 비율은 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 도시화유역에서의 강우지속기간으로 서울의 경우 하천시설기준에 120분으로 결정되어 있는 것과 비교할 때 유역면적과 유역 개발현상에 따라 적정 강우지속기간과 강우분포형을 선정할 때 매우 유의하여야 함을 보여준다. 도시유역에서 통상적으로 적용되고 있는 강우지속기간의 기준인 120분은 유역면적에 따라 임계지속기간을 산정치 못하는 경우에도 적용이 되고 있으나 이는 유역의 특성을 정확히 반영하지 못하는 한계가 있으므로 이의 사용은 지양되어야 한다. 따라서 수문해석이나 설계과정에서 선택할 강우의 시간적 분포형과 지속기간은 이들간의 상관관계를 정확히 분석한 후에 해당지역에 적절한 강우지속기간과 강우분포형을 선정하여야 한다.

6. 결 론

도시화가 진행되고 있는 경남의 Y지구 A, B유역에 대해 ILLUDAS 모형과 SWMM 모형별로 Huff의 4가지 강우분포형과 30, 60, 120, 180분 강우지속기간변화에 따른 유출영향분석을 6개의 재현기간(5, 10, 20, 30, 50, 100년)에 대해 실시하여 강우지속기간과 강우분포형과의 관계에 따른 유출양상을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론들은 다음과 같다.

1. A, B유역에 대해 전 강우지속기간에 대해 Huff의 강우분포형별로 유출량을 산정한 결과 침투유출량의 크기는 전반적으로 4분위, 2분위, 3분위, 1분위순으로 분석되었다.
2. Huff의 4분위와 지속기간에 따른 유출해석결과 A, B유역 모두 침투유출량은 SWMM 모형이, 총유출량은 ILLUDAS 모형이 크게 산정되어 설계기준으로 SWMM 모형을 선정하는 것이 안정측면에서 효과적인 것으로 나타났다.
3. 지속기간변화에 따라 침투유출량을 산정한 결과 A유역의 적정 지속기간은 60분, B유역은 30분인 것으로 분석되었다.
4. Huff의 2분위에 대한 4분위의 침투유출량 유출비율이 지속기간이 증가하면서 평균 10%씩, 총유출량의 유출비율은 평균 2%로 변화하였으며 이는 도시화유역에서의 적정 지속기간과 강우분포형을 선정하는데 활용할 수 있다.

참고문헌

1. 서규우, 허준행, 조원철: "유역개발에 따른 도시하천에서의 유출영향분석", '96년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 348~353, 1996.
2. 허준행, 서규우: "도시유역 강우-유출모형의 적용 및 비교분석 보고서", 한국건설기술연구원, 1996.
3. 서규우: "도시하천에서의 계획홍수량산정에 관한 연구," 석사학위논문, 연세대학교, 1991.
4. 서규우, 배덕효, 심재현, 이재준: "유역개발에 따른 도시하천에서의 유출량 및 도달시간 변화에 관한 연구," 한국수자원학회지, 제29권 제3호, 한국수자원학회, pp. 207-216, 1996.
5. 원석연, 윤용남: "도시유역의 홍수량산정을 위한 도시유출모형 연구," 대한토목학회 논문집, 제13권, 제5호, pp. 135~146, 1993.
6. 이종태, 강태호, 김정환: "도시유역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM모형," 제 4회 수공학위탁, 한국수자원학회, pp. 97-141, 1996.
7. 이종태, 윤세의: "도시유역의 유출특성과 해석모형의 적용성 향상에 관한 연구," IHP 연구보고서, 건설교통부, pp. 5-1~5-42, 1996.
8. Kibler, D.F.: *Urban Stormwater Hydrology*. Water Resources Monograph 7, AGU, pp. 1~159, 1982.
9. Eagleson, P.S.: *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1970.
10. Horton, R.E.: "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle," *Transactions American Geophysical Union*, Vol. 14, pp. 446~460, 1933.
11. Huber, W.C. and Dickinson, R.E.: *Storm water management models; version 4, Part A: User's manual*, EPA/600/3-88/001a, Environmental Protection Agency, 1988.
12. Singh, V.P.: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, pp. 783~808, 1995.
13. Terstriep, M. L. and Stall, J.B.: *The Illinois urban drainage area simulator : ILLUDAS*. Illinois State Water Survey, 1974.