

도시소유역의 설계강수량산정에 따른 유출해석 - 제주도 화산도서를 중심으로 -

김성원^{*} · 조정석¹ · 고병련²

영남대학교 토목공학과 · ¹대구대학교 토목공학과 · ²제주전문대학 토목과

1. 서 론

도시유역에서 호우로 인한 유출과정은 강우로부터 시작하여 침투, 지표면유출, 우배수관거를 통한 홍수파의 흐름 그리고 유역의 말단부에 존재하는 우수지로의 유입 및 도시하천으로 유출을 나눌 수 있다. 1960년대 이후로 급격한 인구의 증가와 공업화·산업화·도시화의 영향으로 도시로의 인구집중 및 가구의 증가, 상가면적의 확대등으로 인하여 도시지역은 자연하천유역과는 상이한 유출특성을 가지게 된다. 본 연구에서는 화산도서 제주도의 도시소유역인 북제주군 구좌읍 송당천유역에서의 1997년 8월 3일 집중호우에 의한 가옥침수, 도로유실, 농경지침수, 유실 등 많은 피해가 발생하였다. 따라서 본 홍수의 분석과 이러한 홍수피해를 최소화하기 위한 재해방지의 일환으로 개발유역면적과 개발유역형상이 상이하여 도달시간이 서로다른 두 개의 배수유역에 대해 Huff's의 4분위법에 의한 강우분포형과 60분, 120분, 180분, 240분의 4가지 강우지속기간으로 나누어서 도시유출해석을 통하여 화산도서유역에서 우수처리시설, 하수처리시설 및 수해방지대책의 수립시에 있어서 기본자료로 제공하는 것을 본 연구의 목적으로 하고있다.

2. 적용모형이론

본 연구에서는 제주도 화산도서유역의 구좌읍 송당천 배수관로에서의 강우지속시간에 따른 유출특성을 분석하기 위하여 도시유출 모형중에서 기왕의 연구에 의하여 국내에서 그 적용성을 인정받은 바 있는 ILLUDAS(Illinois Urban Drainage Area Simulator)와 SWMM(Storm Water Management Model)을 적용하였으며, 그 기본이론은 다음과 같다.

2.1 ILLUDAS모형

1974년 Terstriep & Stall에 의해 처음 개발되어 1984년, 1986년에 개정된 모형이다. 이 모형의 기본개념은 RRL방법과 같으나, 포장유역 및 투수유역의

유출량을 소유역별로 각각 구한후 이를 합성하여 수문곡선을 얻으며, 이 수문곡선을 관거를 따라 추적·합성하여 유역 말단부에서의 총 유출수문곡선을 구하게 된다. 관의 설계를 위하여 모형을 적용할 경우에는 각 지점에서의 관의 직경을 모형에서 결정할 수 있으며 또한 각 지점에서의 관거 합류점의 저류용량을 고려 할 수도 있다. 이 모형은 유역을 직접연결포장유역, 간접연결포장유역, 직접연결투수유역 및 유출에 기여하지 않는 유역의 4가지로 구분하여 각각에 따라 손실량과 흐름상태를 구분 해석하도록 되어 있으며, 모형의 계산절차는 먼저 대상유역의 구분 및 소유역별 입력자료의 결정, 포장유역의 유출량 계산, 투수유역의 유출량 계산, 수문곡선의 합성 및 관로를 통한 추적순으로 이루어져 있다.

2.2 SWMM모형

SWMM모형은 도시유역내에서 강우로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량산정, 오염물질의 처리와 비용계산등을 모의할 수 있는 종합적인 모형으로 우리나라 도시유역에서의 적용성을 많은 과학자들에 의하여 검토되었으며, SWMM모형의 RUNOFF블록을 이용한 지표면유출 및 관로유출해석이론은 다음과 같다.

2.2.1 지표면유출해석

RUNOFF블록에서 지표면유출을 위한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 kinematic wave근사법인 비선형저류방정식이 사용된다. RUNOFF블록은 각 소유역에서의 수심과 유량을 결정하기 위하여 연속방정식과 Manning방정식을 이용한다. kinematic wave근사법은 배수영향이 큰 경우에는 적합하지 않으며, 급경사, 완만한 홍수파의 상승구간에는 적용이 가능하다. 계산을 수행하는 데는 상류부 경계조건만이 필요하고, 각 수로요소는 다른 요소에 대해 독립적인 계단형수로로 가정한다.

2.2.2 관로유출 해석

RUNOFF블록에서의 관로유출은 비선형 저류방정식으로부터 계산되며, 방정식의 해를 구하기 위하여 모형개발초기에는 수정 Euler방법을 사용하였으나, 보다 안정된 해를 얻기위해 Newton-Raphson방법으로 대체되었다. Manning식이 각 적분 연산구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동은 준정상(Quasi-steady)상태로 근사 처리하였다. 이 방법은 수심 d 와 단면적 A 가 시간에 따라 급하게 변화하지 않는 경우에 그 적용성이 크다. 관로유출에서 각 시간간격사이에서 정상류라는 가정한다.

3. 적용유역 특성자료

3.1 설계강우량의 산정

본 연구대상유역은 제주도 북제주군 구좌읍 세화-송당지역의 송당천유역으로서, 설계강우량을 산정하기 위하여 먼저 제주도전역을 Thiessen가중치법에 의해 유역을 분할하고, 제주도전역의 4개 자기강우관측소인 제주고층, 제주, 서귀포 및 성산포강우관측소의 지속시간별 강우자료를 한국건설기술연구원의 수문자료실(D/B)에서 신뢰성있는 강우자료를 수집하였으나, 제주고층의 경우는 강우자료가 1988년이후부터 나머지 강우관측소는 1981년이후부터의 자료가 보관되어 있어 적정 설계강우량산정에 필요한 최소 30년간의 자료로는 부족한 실정이므로, 나머지 분석에 필요한 자료는 기상년보에서 강우관측소별로 1일 연최대 발생일을 미리 조사한 후 그 시간 전후의 자기기록지를 입수하였으며, 이와 동일한 스케일로 지속시간을 그려서 작성한 투사지를 이용하여 지속시간별로 연최대 강우량을 발췌하여 부족한 자료를 보완하였다. 따라서 본 연구에서는 각 강우관측소에서 연간 지속시간별 최대치 강우자료를 이용하여 수문자료 해석에 적합하다고 알려진 Slade, Gumbel-Chow, IWAI, 2 Parameters Log-normal, 3 Parameters Log-normal, Type-I Extreme, Pearson Type-III, Log-Pearson Type-III의 8가지 확률분포형을 적용하여 확률가중모멘트법으로 매개변수를 추정하고 각 확률분포형의 매개변수 적합성을 조사하였다. Table 1은 Type-I Extreme에 의한 각 지속시간별 유역평균설계강우량을 나타낸 것이다.

Table 1. Design Storm for Duration and Return Period Analysis in Cheju Island by the Type- I Extreme

(Unit : mm)

Duration(hr) \ Return Period(year)	1	2	3	4	6	8	10	12	24
2.33	45.3	67.3	80.2	95.3	114.6	129.8	144.4	150.9	188.1
5	58.8	89.2	109.5	128.0	153.2	174.7	192.4	204.2	257.4
10	69.9	107.0	132.4	154.7	184.5	211.2	231.4	247.6	313.9
20	80.4	124.1	150.8	180.2	214.6	246.3	268.9	289.2	368.0
30	86.5	133.9	167.5	194.9	232.0	266.5	290.4	313.1	399.1
50	94.1	146.2	180.4	213.2	253.6	291.7	317.4	343.0	438.1
80	101.0	157.5	192.1	230.1	273.4	314.7	342.0	370.4	473.7
100	104.3	162.8	201.3	238.0	282.8	325.7	353.7	383.4	488.7
150	110.3	172.5	213.9	252.5	299.8	345.5	374.9	406.9	521.2

3.2 설계강우량의 시간적분포

설계강우량의 재현기간은 국내의 경우 건설부의 하수도 시설기준¹⁾에 의하면 5~10년으로 규정하고 있다. 한편 설계강우량의 지속시간은 설계홍수량을 최대로 하는 지속시간으로 유역에 따라 적용하여야 하나, 국내 하수도시설기준에서는 우수지, 배수펌프장등의 설계시 강우지속기간은 보편적으로 120분을 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 도시수문량해석에서 가장 적절하다고 조사

된 120분 지속시간을 기준으로 결정하였고, 강우의 시간적분포형은 과거 강우 사상의 통계적 특성값을 고려하는 Huff's 4분위법에 의한 분포를 사용하였다. 본 연구조사에 의하면 제주도 고층관측소에서 25개의 호우를 비롯하여 제주, 서귀포, 성산포관측소에서 각각 40개의 호우의 단기간 강우자료를 수집하여 분석한 결과 제주도에서는 Huff's의 4분위중 2분위에 해당하는 강우분포가 35%에 해당하여 가장 많았으며 이를 제주도에서의 적정 시간분포형으로 결정하였으나, 기존의 배수처리유역과는 판이하게 다른 화산도서유역에서의 유출특성임을 고려하여 본 연구에서는 4가지 분포형에 대해 모두 적용을 하여서 각 분포형별로 유출변화양상을 분석하고자 한다.

3.3 유역현황 및 배수체계

본 연구대상유역인 제주도 북제주군 구좌읍 송당천유역에서 우수배제시설 검토지역의 수문학적 특성을 분석하기 위하여 대상유역내의 지형특성을 고려한 결과 A(면수동), B(통항동), C(중앙동), D(전항동)의 4개의 유역배수시스템을 구성하였으나, 그 중 배수처리시설이 잘 구성되어 있고, 유역의 개발유역면적과 개발유역형상이 상이한 A(면수동), B(통항동)유역을 연구대상유역으로 선택하였으며, Table 2는 A, B유역의 배수체계현황이다.

Table 2. Drainage System Data of Cheju Urban Catchment(A, B Basin)

	A	B
Basin Area	27.6 ha	201.4 ha
Channel Length	855m	3,600m
Channel Slope	0.009	0.015
Soil Group	A Type	A Type
Sub-Basin	5	15
Upper Drainage Pipe	φ 450mm	□0.4 x 0.5
Lower Drainage Pipe	φ 600mm	□2.0 x 1.5

3.4 지질특성

본 연구대상유역인 송당리유역의 지질은 침상장석감람석현무암(FOB)과 비현정질현무암(APB)분포지대로서, 침상장석감람석현무암은 장석과 감람석의 반정을 함유하는 치밀한 암석으로 암석표면에는 주상절리가 잘 발달되어 있으며, 다공질이고 기공이 크며 투수성이 양호한 암질로서 곳에따라 다양한 변화를 나타내는 특징을 갖고있고, 비현정질현무암은 비현정질이고 다공질이며 길쭉한 기공 및 투수성이 양호한 암질로서의 특징을 갖고 있다. 따라서 이러한 지질 및 투수특성에 때문에 본 연구에서의모형 매개변수결정에 있어서 ILLUDAS모형의 토양형의 종류를 SCS의 토양분류에 의하여 침투율이 매우 높고, 유출율이 매우 낮은 진흙, silt가 거의 없는 깊은 모래층 또는 자갈층의 토양인 A형으

로 선택하였으며, 선행토양함수조건(AMC)는 AMC-I의 상태를 선택하였고, 녹지지역의 초기손실량을 8.0mm, 포장지역의 초기손실량을 4.0mm로 결정하였다. 또한 SWMM모형에서는 초기침투능을 254.0mm/hr, 중기침투능을 25.4mm, 손실저류깊이를 투수지역은 8.00mm, 불투수지역을 4.00mm로 결정하였다.

4. 모형의 적용 및 비교분석

4.1 모형의 검증

본 연구에서는 유출모형의 검증을 위하여 1997년 8월 3일 16시~20시까지 관측된 우량(3시간 최대강우 317.00mm), 수위자료(B유역 최고 EL. 11.24m) 및 횡단면자료를 이용하였다. 따라서 1997년 8월 3일 16시~20시 사이에 발생한 3시간 최대강우량인 317.00mm에 의한 유출모의에서 ILLUDAS모형에서의 선행토양함수조건과 초기손실량 및 SWMM모형에서는 초기침투능, 중기침투능 및 손실저류깊이를 전절에서 산정한 값과 동일한 조건에 의해 유출량을 산정한 결과, 총유출양상은 약 240분에 걸쳐서 이루어졌으며, B유역의 하류단 수위관측지점에서의 총유출체적은 ILLUDAS모형에서는 약 259,588 m^3 이고, SWMM모형에서는 약 157,000 m^3 으로 산정되었으며, 침투유량은 강우개시후 ILLUDAS모형에서는 150분이 경과하여 약 28.283 cms가 되는 것으로 나타났으며, SWMM모형에서는 약 120분이 경과하여 약 16.446 cms가 되는 것으로 분석되었다. Fig. 1에서는 모형에 의해 계산된 유출수문곡선과 수위관측자료를 나타내었다.

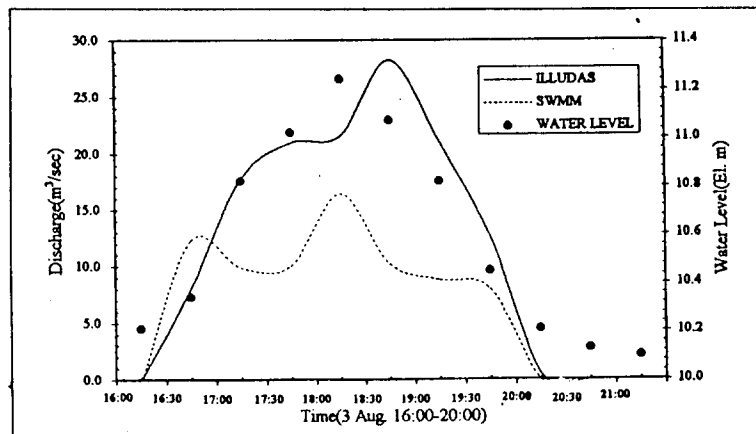


Fig. 1 Comparison of Calculated Discharge and Observed Water Stage (1997. 8. 3 Storm - B Area)

4.2 모형의 적용

본 연구에서는 제주도 도서유역의 도시소유역인 송당천유역의 A, B배수시스템에서 도시유출모형인 ILLUDAS, SWMM모형을 적용하기 위하여, Huff's의 4분위법에 의해서 설정된 강우분포형을 이용하여 재현기간과 강우지속기간에 따른 침투유출량, 총유출체적 및 침투발생시간을 산정하였다. ILLUDAS모형과 SWMM모형에 적용한 결과중 침투유출량(m^3/sec), 총유출체적(m^3), 침투발생시간(min)산정치를 A유역은 60분 지속기간, B유역은 120분 지속기간에 대해 정리하면 Table 3(a)~(b)와 같다. 또한 다음 Fig. 2(a)~(d)는 본 연구대상유역인 A, B유역에서 Huff's의 4분위에 대한 임계지속기간의 재현기간별 유출수문곡선을 나타낸 것이다. 대체적으로 지속기간, 재현기간, Huff's의 분위에 대해서 거의 비슷하게 나타내고 있어서 두 모형의 유출량산정이 적절한 것으로 판단된다.

Table 4(a) Result of Runoff Analysis at A Drainage Basin in Cheju Volcanic Island

Duration(min) Return Period(year)		ILLUDAS(60min)				SWMM(60min)			
		Huff's 1	Huff's 2	Huff's 3	Huff's 4	Huff's 1	Huff's 2	Huff's 3	Huff's 4
2.33	$Q_p(m^3/sec)$	2.71	3.42	3.28	4.15	3.04	3.64	3.43	4.50
	$Q_t(m^3)$	5,137	5,137	5,149	5,199	5,390	5,370	5,380	5,390
	$T_p(min)$	12.5	30.0	45.0	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
5	$Q_p(m^3/sec)$	3.53	4.53	4.29	5.41	4.00	4.57	4.31	5.61
	$Q_t(m^3)$	6,861	6,862	6,874	6,823	7,110	7,090	7,110	7,000
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
10	$Q_p(m^3/sec)$	4.23	5.30	5.12	6.42	4.68	5.30	5.04	6.50
	$Q_t(m^3)$	8,237	8,224	8,261	8,249	8,490	8,450	8,460	8,420
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
20	$Q_p(m^3/sec)$	4.94	6.11	5.84	7.44	5.28	5.96	5.71	7.31
	$Q_t(m^3)$	9,536	9,548	9,549	9,859	9,780	9,780	9,770	9,700
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
30	$Q_p(m^3/sec)$	5.24	6.55	6.30	8.04	5.62	6.35	6.11	7.77
	$Q_t(m^3)$	10,336	10,324	10,324	11,326	10,600	10,500	10,500	10,500
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
50	$Q_p(m^3/sec)$	5.75	7.17	6.82	8.78	6.08	6.88	6.57	8.48
	$Q_t(m^3)$	11,299	11,286	12,109	13,269	11,500	11,500	11,500	11,400
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
80	$Q_p(m^3/sec)$	6.12	7.72	7.32	9.47	6.48	7.34	7.04	9.04
	$Q_t(m^3)$	12,087	12,307	13,934	15,075	12,400	12,300	12,400	12,300
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0
100	$Q_p(m^3/sec)$	6.43	7.94	7.60	9.99	6.68	7.54	7.23	9.29
	$Q_t(m^3)$	12,523	13,042	14,743	15,812	12,700	12,700	12,700	12,700
	$T_p(min)$	12.5	30.0	47.5	60.0	5.0	25.0	35.0	60.0

Table 4(b) Result of Runoff Analysis at B Drainage Basin in Cheju Volcanic Island

Duration(min) Return Period(year)		ILLUDAS(120min)				SWMM(120min)			
		Huff's 1	Huff's 2	Huff's 3	Huff's 4	Huff's 1	Huff's 2	Huff's 3	Huff's 4
2.33	$Q_p(m^3/sec)$	3.89	4.75	4.47	6.04	8.85	10.39	10.07	11.27
	$Q_t(m^3)$	14,116	14,071	14,093	14,118	44,500	43,000	39,800	33,200
	$T_p(min)$	15.0	55.0	80.0	120.0	15.0	50.0	75.0	120.0
5	$Q_p(m^3/sec)$	5.22	6.30	5.97	7.88	10.49	11.41	11.22	12.56
	$Q_t(m^3)$	19,000	19,042	18,976	19,008	81,500	76,100	71,600	69,700
	$T_p(min)$	15.0	55.0	80.0	120.0	15.0	50.0	70.0	120.0
10	$Q_p(m^3/sec)$	6.35	7.58	7.17	9.61	11.59	12.24	12.00	13.57
	$Q_t(m^3)$	22,969	22,990	23,035	25,778	95,500	91,900	85,800	79,200
	$T_p(min)$	15.0	55.0	80.0	120.0	10.0	50.0	70.0	120.0
20	$Q_p(m^3/sec)$	7.43	8.83	8.25	11.72	12.29	13.02	12.79	14.58
	$Q_t(m^3)$	26,850	26,805	30,321	46,518	105,000	101,000	95,800	88,700
	$T_p(min)$	15.0	55.0	80.0	120.0	10.0	50.0	70.0	120.0
30	$Q_p(m^3/sec)$	7.85	9.52	9.35	12.91	12.67	13.48	13.20	15.18
	$Q_t(m^3)$	28,924	28,946	45,144	61,276	110,000	106,000	102,000	94,300
	$T_p(min)$	15.0	55.0	80.0	120.0	10.0	50.0	70.0	120.0
50	$Q_p(m^3/sec)$	8.70	10.34	10.00	14.72	13.24	14.03	13.75	15.87
	$Q_t(m^3)$	31,688	36,418	65,374	80,775	117,000	113,000	110,000	103,000
	$T_p(min)$	15.0	55.0	85.0	120.0	10.0	50.0	70.0	120.0
80	$Q_p(m^3/sec)$	9.34	11.19	10.81	15.43	13.81	14.54	14.26	16.56
	$Q_t(m^3)$	34,917	50,623	84,115	97,845	124,000	120,000	116,000	110,000
	$T_p(min)$	15.0	55.0	85.0	120.0	5.0	50.0	70.0	120.0
100	$Q_p(m^3/sec)$	9.81	11.59	11.03	15.92	14.01	14.77	14.49	16.88
	$Q_t(m^3)$	41,445	57,299	93,076	105,949	126,000	123,000	119,000	113,000
	$T_p(min)$	15.0	55.0	90.0	120.0	5.0	50.0	70.0	120.0

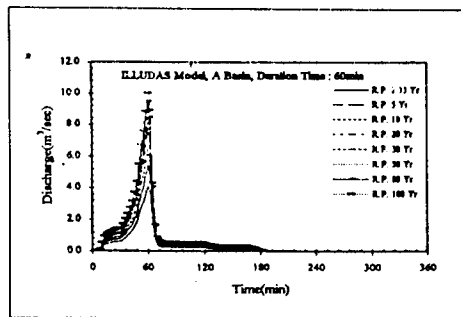


Fig. 2(a) Hydrograph by ILLUDAS Model
(A Basin, Critical Duration Time : 60min)

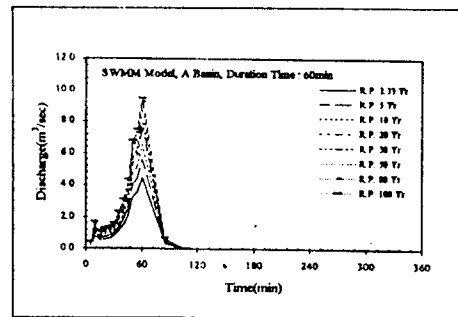


Fig. 2(b) Hydrograph by SWMM Model
(A Basin, Critical Duration Time : 60min)

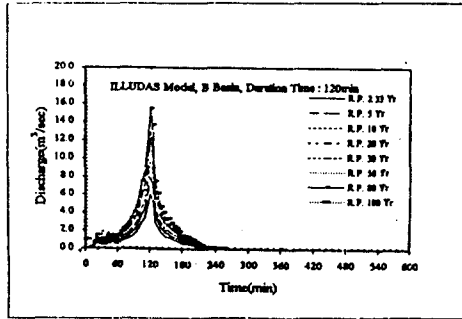


Fig. 2(c) Hydrograph by ILLUDAS Model
(B Basin, Critical Duration Time : 120min)

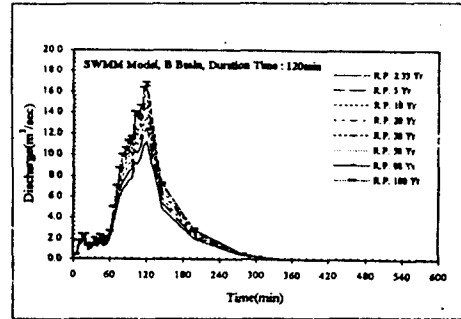


Fig. 2(d) Hydrograph by SWMM Model
(B Basin, Critical Duration Time : 120min)

5. 결 론

본 연구에서는 제주도 북제주군 구좌읍 세화-송당유역에 1997년 8월 3일 폭우로 인하여 가옥침수, 농경지침수, 유실 등 많은 피해가 발생하였다. 따라서 본 홍수의 분석과 이러한 홍수피해를 최소화하기 위한 재해방지의 일환으로 개발유역 면적과 개발유역형상이 상이하여 도달시간이 서로다른 두 개의 배수유역에 대해 ILLUDAS모델과 SWMM모델을 이용하여 Huff's의 4분위법에 의한 강우분포형과 60분, 120분, 180분, 240분의 4가지 강우지속기간별로 나누어서 8가지의 재현기간에 대해서 도시유출해석을 실시하였다.

1) 제주도 화산도서유역의 강우특성분석을 위하여 제주도 전역을 Thiessen망을 구축하여 4개소유역으로 분할하였으며, 강우의 시간적분포는 Huff's의 4분위법을 이용하여 분석한 결과 Huff's의 2분위법이 가장 적절한 분포형으로 분석되었다.

2) 본 연구에서는 도시유출모형인 ILLUDAS모형과 SWMM모형을 이용하여 Huff's의 4분위법과 강우지속기간에 따른 유출해석의 결과 A유역은 침투유출량 및 총유출체적에 두 모형의 큰 차이는 없으나, B유역은 SWMM모형이 높게 산정되어, 배수 및 우수거의 설계기준으로 SWMM모형을 선정하는 것이 안정측면에서 효과적인 것으로 나타났다.

3) ILLUDAS모형과 SWMM모형의 Huff's의 2분위에 대한 4분위의 침투유출량 유출크기비율(%)을 산정하면 강우지속기간이 증가하면서 Huff's의 2분위에 의한 침투유출량산정값이 작아지고, Huff's의 4분위와의 차이를 나타내는 비율은 더 크게 산정되는 것으로 분석되었다.

6. 참 고 문 헌

- 1) 건설교통부, 1992, 하수도 시설기준.
- 2) 건설교통부, 1993, 하천시설기준.
- 3) 서규우, 배덕효, 심재현, 이재준, 1996, 유역개발에 따른 도시하천에서의 유출량 및 도달시간 변화에 관한 연구, 한국수자원학회지, 제 29권, 제 3호, pp. 207~216
- 4) 제주도청, 1997, 폭우피해지역(구좌읍) 항구대책 연구

- 5) 조정석, 김성원, 1998, 도시화유역에서 내수처리분석을 위한 강우분포형별 홍수유출특성, 대구대학교 과학기술연구소 과학기술연구, 제 6집 제 1호.
- 6) 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획수립보고서.
- 7) Horner, W.W. and F.L. Flynt., 1936, Relation Between Rainfall and Runoff from Small Urban Areas, Trans. ASCE, 20, No. 140.
- 8) Huber, W. C., Heaney, J. P., Nix, S. J., Dickonson, R. E., and Polman, D. J., 1992, Storm Water Management Model, User's manual, Version 4.2, U.S. Envir. Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- 9) Terstriep, M.L. and Stall, J.B., 1974, The Illinois Urban Drainage Area Simulator - ILLUDAS, Bulletin 58, State Wat. Surv., Urbana, Illin.