국내 도시유역에 대한 SWMM의 적용성 분석

이종태*, 윤세의*, 이상태**, ㅇ조세일*

1. 서론

도시 배수유역에서의 하수도, 유수지, 펌프장, 배수문 등의 도시 수공구조물을 설계하기 위하여서는 적절한 강우-유출 해석모형이 필요하다. 국내에서 설계홍수량을 산정하는데 사용하고 있는 모형으로는 합리식, RRL, ILLUDAS 등이 있다. 도시유역에는 고리(loop)형 관망, 웨어, 오리피스, 펌프장 등이 설치되고있으며, 이들의 영향이 고려된 강우-유출 모형이 필요하게 되었다. 국내의 도시유출에 관한 연구로는 주로 외국에서 개발된 유출모형을 국내유역에의 적용 가능성 평가와, 우리나라의 강우특성과 배수유역특성에 따른 유출 수문곡선의 특성을 분석하는 것을 중심으로 연구가 진행되고 있으며, 배수관망, 도시하천, 유수지, 우수펌프장 등의 설계에 활용되고 있다.

본 연구에서는 SWMM의 RUNOFF블럭에서 지표면 유출을 계산시 유역의 합성 및 분할방법에 따라 지표면 유출량이 크게 차이가 발생하고 있어서, 유역폭의 변화에 따른 유출특성을 분석하였다. 또한 SWMM의 국내적용성을 분석하기 위하여, 서울시내 5개의 배수유역의 형태, 크기, 관거길이 등을 고려하여 성내(80.7ha), 마포(252.2ha), 잠실2(339.5ha), 잠실1(562ha) 및 신정(1267 ha) 배수유역을 선정하였다. 선정된 각유역에 현재 실무에서 사용되고 있는 RRL, ILLUDAS모형들을 같이 적용하여 유출특성을 비교 분석하였다. 이때 서울지방에서 10년빈도의 강우강도식과 HUFF의 제2분포를 사용하여 강우총량과 분포를 결정하였다. 각 유출모형으로부터 계산된 첨두유량, 첨두유량의 도달시간 등이 비교되었으며, 마포유역을 5가지의 조건으로 구분하여, 유역폭(area width)의 변화에 따른 유출특성을 분석하였다.

2. 모형의 기본방정식

SWMM은 주실행블럭(EXECUTIVE, RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN, STORAGE/TREATMENT블럭)과 보조블럭(GRAPH, COMBINE, RAIN, TEMP, STATISTIC블럭)으로 구성되어있다.

---

* 경기대학교 토목공학과

** 건설부 수자원국 하천계획과

① RUNOFF 블럭

RUNOFF블럭은 각 소유역에서의 수심과 유량을 결정하기 위하여 연속방정식과 Manning방정식을 사용한다.

$$\frac{\Delta d}{dt} = i - \frac{W}{A \times n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (1)$$

식(1)에서 d는 수심, t는 시간(sec), W는 유역폭(m), n은 Manning조도계수, d_p는 지표면 저류깊이(m), S는 유역경사, A는 유역면적(m^2), i는 강우 초과량이다.

② TRANSPORT 블럭

TRANSPORT블럭은 연속방정식(식2)와 운동량방정식(식3)으로 구성된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (3)$$

여기에서, S_0는 관로의 경사이며, 마찰경사 S_f와 같다고 가정하고, 각 시간간격 사이에서 흐름은 정상류로 간주한다. X는 관로의 길이, A는 관의 단면적, R은 동수반경, n은 Manning의 조도계수, Q는 유량, t는 시간을 나타낸다.

③ EXTRAN블럭

EXTRAN 블럭에서 흐름에 대한 기본 방정식은 연속방정식(식4)와 개수로에서의 일차원 점변부정류방정식인 St.Venant 방정식(식5)를 사용한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + g A S_f = 0 \quad (5)$$

3. 유역폭 산정방법

일반적으로 계산의 정도를 높이기 위하여 지표면 유출은 RUNOFF블럭으로, 관로 흐름추적은 EXTRAN블럭이나 TRANSPORT블럭으로 계산하고 있다. 지표면 유출의 정확한 계산은 유출량계산에서 필수적이다. 유역의 분할 및 합성은 계산결과치에 크게 영향을 미치는 요소 중의 하나이다. 유역의 형태는 면적, 유역폭, 경사 등의 요소로 특성이 분류되며, 지표면의 형태는 저류깊이, 조도계수, 등으로 구분된다. 지표면 유출은 개념화된 직사각형 집수유역 수로에 대해 직각방향의 흐름이 진행된다고 가정한다. 여기에서 유역폭이란 지표면의 물리적인 폭으로 정의된다. 그러나 일반적인 배수유역은 균등한 특성을 가진 대칭 직사각형과는 거리가 있으므로, 자연상태의 유역폭을 결정하는 일반적인 방법이 요구된다. 유역의 경사와 조도계수가 결정되면 유역폭

이 변화하게되고, 유출수문곡선이 변하므로 유역폭의 결정은 중요하다. 유역폭이 증가하면 유출은 신속하게 진행되며, 일반적으로 도달시간은 감소한다. 강우가 진행됨에 따라 지표면유출이 평형상태에 도달하게 되면, 지표면 저류량은 감소하게 되고, 유출량은 증대하게 된다. 유역폭을 알맞게 보정하면 여러 소유역을 합성된 하나의 등가소유역으로 구성된다. 이때 합성에 따라 손실된 저류량을 보정하는 것이 중요하다. 조도계수와 경사는 유역합성시 평균치를 이용하게 되므로 실제의 유역 합성시에는 보정하여야 할 중요인자는 유역폭이다. 배수유역이 불규칙하고 관로가 배수유역의 중심부에 위치하고 있지 않는 경우에는 무차원 왜곡도계수(skewness factor)를 이용하여 직사각형의 유역으로 변환한 후 유출을 계산한다. 이때 유역의 왜곡도 계수는 식(6)을 이용한다. A는 배수유역 전체면적이며, A_1과 A_2는 주관로가 A를 양분할 때 주관로의 좌우측의 면적이다.

$$S_k = \frac{(A_2 - A_1)}{A} \qquad (6)$$

이때 유역폭은 식(7)과 같이 계산한다.

$$W = 2L - S_kL \qquad (7)$$

유역폭은 실제로 L부터 2L사이에서 결정된다. S_k가 0이면 유역의 중심으로 길이가 L인 관로가 지나가며, 직사각형의 형태로 유역폭이 2L인 유역면적의 형태로 가정한다. 마포유역을 그림1과 같이 유역폭을 변화 시키기 위하여 5가지 경우로 구분하였으며, RUNOFF블럭으로 지표면 유출량을 계산하였다. 이때의 가정은 아래와 같다.

① 유역길이(여기서는 주관로길이)를 고정하여 유역폭을 선정한 후 다시 환산길이를 산출하였다.

② 지표면 유출량의 비교는 순수한 RUNOFF BLOCK만을 이용하였으며 모의시간은 180분으로 고정하였다.

③ 지표면적은 세분화하여도 면적의 합은 항상 252.2ha로 일정하다.

④ 강우의 조건은 일정하다.

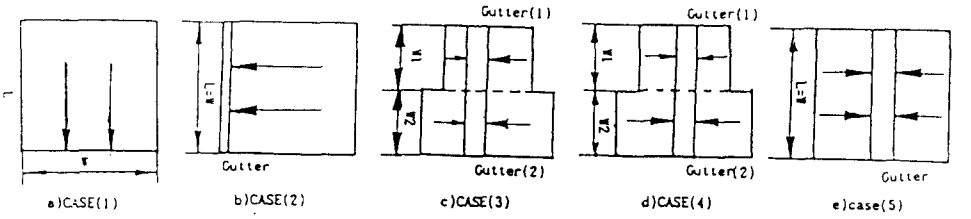

그림1 유역폭의 변화에 따른 유역형태

(1) CASE(1)은 그림1(a)와 같이 관로유출이 전혀 없으며, 주관거의 길이를 유역면적으로 나누어 직접 유역폭을 계산하였다. 유역폭은 1367.6m이다.

(2) CASE(2)는 그림1(b)와 같이 왜곡도계수가 1로서 측방의 관으로 유입되었다가 하류로 유출되는 경우이며 유역의 폭과 관로의 길이는 같으며, 그 값은 1844.0m이다.

(3) CASE(3)은 그림1(c)와 같이 유역을 2개로 구분하였으며, 중앙에 있는 관로를 통하여 유출이 발생된다. 상류측 유역의 왜곡도계수는 0.43이고, 하류측 유역의 왜곡도계수는 0.23인

경우이다. Gutter(1)의 길이는 885m이고, Gutter(2)의 길이는 959m이며, 유역폭은 각각 1389.5m와 1697.4m이다.

(4) CASE(4)는 그림1(d)와 같이 유역을 2개로 나뉘었으며, 배수로를 정중앙에 배치하여, 왜곡도계수 값이 0인 경우이다. Gutter(1)과 Gutter(2)의 길이는 CASE3과 같고, 각각의 유역폭은 1770m, 1918.0m이다.

(5) CASE(5)는 그림1(e)와 같이 유역의 중앙에 배수관로가 위치하며, 왜곡도계수값이 0인 경우이며, 유역폭은 3688m이다.

유출수문곡선의 결과는 그림2와 같이 유역폭의 증가에 따라, 유출량은 증가되고, 저류량은 감소되었다.

4. SWMM의 적용

SWMM모형내의 RUN-TR(RUNOFF+TRANSPORT), RUN-EX(RUNOFF+EXTRAN)과 기존 강우-유출 모형인 RRL, ILLUDAS모형을 5개의 서울시유역에 적용하였다. 계산된 유출수문곡선은 지면의 제약 때문에 5개유역중 마포유역(그림3)의 결과치만 수록하였다.

5. 비교 및 고찰

(1) 유역폭의 변화에 따른 유출특성 비교

표 1. 유역폭의 변화에 따른 유출특성 비교

	CASE(1)	CASE(2)	CASE(3)	CASE(4)	CASE(5)
유 역 폭(M)	1,367	1,844	3,086	3,688	3,688
표면 유출량 (M^3)	142,286	14,717	153,072	154,652	155,048
저류량(M^3)	22,086	17,199	11,309	9,736	9,339
첨두치(CMS)	45.9	53.6	66.0	69.8	70.4

표1에서와 같이 유역폭의 증가에 따라 표면유출량과, 첨두치는 증가하며, 저류량은 감소하고 있다. 첨두치의 경우 CASE(3)는 비교적 RUN-TR, ILLUDAS모형의 첨두치와 비슷한 결과를 얻었으며 이는 유역의 분할 통합에서 실제의 지형과 가장 잘 일치되는 경우로 생각된다.

(2) 적용성 비교

① 유역별 모형별 첨두량

표 2. 첨두치 비교 단위: CMS

	성내	마포	잠실2	잠실1	신정
R R L	15.1	61.2	89.1	129.6	219.1
ILLUDAS	15.4	49.9	50.8	90.5	170.5
RUN-TR	12.5	65.5	69.4	80.5	224.5
RUN-EX	18.1	63.0	82.9	98.2	218.4

유역별 모형별 첨두유량은 표2에서와 같이 RRL, RUN-EX 값이 비교적 크게 계산되었으며, ILLUDAS와 RUN-TR값이 작게 계산되었다. RRL을 제외하고 비교하면 관거밀도가 높을수록 RUN-EX의 첨두치가 증가되고 있음을 알 수 있으며, 이는 RUN-EX가 배수효과를 다른 모형에 비해 잘 모의 할 수 있기 때문으로 판단되며, 관거밀도가 높은 유역에서는 RUN-EX을 사용하는 것이 합리적으로 생각된다.

②유역별 모형별 첨두유량의 도달시간

표 3 도달시간 비교 단위: 분

	성내	마포	잠실2	잠실1	신정
R R L	35	35	40	40	60
ILLUDAS	30	30	40	35	45
RUN-TR	30	30	40	35	40
RUN-EX	29	29	37	37	37

첨두유량의 도달시간은 RRL이 가장 길게 계산되었으며, RUN-EX가 가장 짧게 계산되었다(표 3). 동일한 지표면 유출조건에서도 RUN-EX가 RUN-TR에비해 도달시간이 짧게 계산되었으며, 그 이유는 관로내의 흐름추적이 RUN-TR보다 RUN-EX가 부정류의 흐름을 더욱 잘 모의 할 수 있기 때문이라고 생각된다.

6. 결론

SWMM(Storm Water Management Model)내의 RUNOFF, TRANSPORT 및 EXTRAN블럭을 서울시내의 5개 배수유역에 적용하여 얻은 결과와 현재 실무에서 관거, 유수지, 펌프장 등의 설계에 사용되고 있는 유출모형(RRL, ILLUDAS)의 결과를 비교 분석하여 국내 도시 배수유역에서 SWMM의 적용성을 검토하였다. ILLUDAS와 RUN-TR모형은 비교적 근사한 계산 결과치를 나타냈으며, RUN-EX모형은 비교적 다른 모형보다 첨두유량의 도달시간이 짧게 계산되었다. 유역폭이 증가되면 유출총량과 첨두유량은 증가되었으며, 유역의 형태와 유사하게 유역을 분할, 통합하는 것이 지표면 유출량 계산시 바람직하다. 대상유역에 실측치가 없었기 때문에 모형별 결과치를 절대 비교할 수 없었다. 앞으로 도시배수유출의 실측치를 이용하고, 분석대상 유역을 증가시키면서 SWMM의 특성을 비교 분석함이 요망된다.

참고문헌

1. 김정환(1993), 도시유역에서 강우-유출해석을 위한 SWMM 모형의 연구, 경기대학교 석사학위 청구논문, PP. 11-39.
2. 서울특별시(1991), 하천연안 수공구조물 안전진단및 관리대책 조사연구보고서, P.576.
3. 신현석(1993), 도시소유역에서의 유출과 비점원오염물 배출 간의 상관관계에 관한 연구, 고려대학교 석사학위 논문, P.86.
4. 윤용남, 전병호, 이종태(1992), 도시홍수 재해방지를 위한 내수처리 시스템분석및 설계기법개발, 한국과학재단, pp.1-103.
5. Huber, W.C and Dickinson, R.E(1988)., "Storm Water Management Model: User's Mannual(Ver 4.2), E.P.A, pp. 59-494.
6. Kibler.D.F.(1982)., "Urban Stormwater Hydrogy", A.G.U, pp. 69-159.

7. "Storm Water Management Model", Vol.1 Final Report, Environmental Protection Agency, 1971.
8. Terstrip, M.L. and Stall, J.B(1974)., "The Illnois Urban Drainage Simulator, ILLUDAS", Illinoise State Water Survey, p.90.
9. Warwick, J.J., and Tadepalli, P.(1991). "Efficacy of SWMM Application" J. Water Resour. Planning and Mgmt., ASCE, pp. 352-365.
10. Zaghoul, N.A.(1981). "SWMM Model and Level of Discretization", Journal of Hydraulic division., ASCE, pp. 1535-1545.

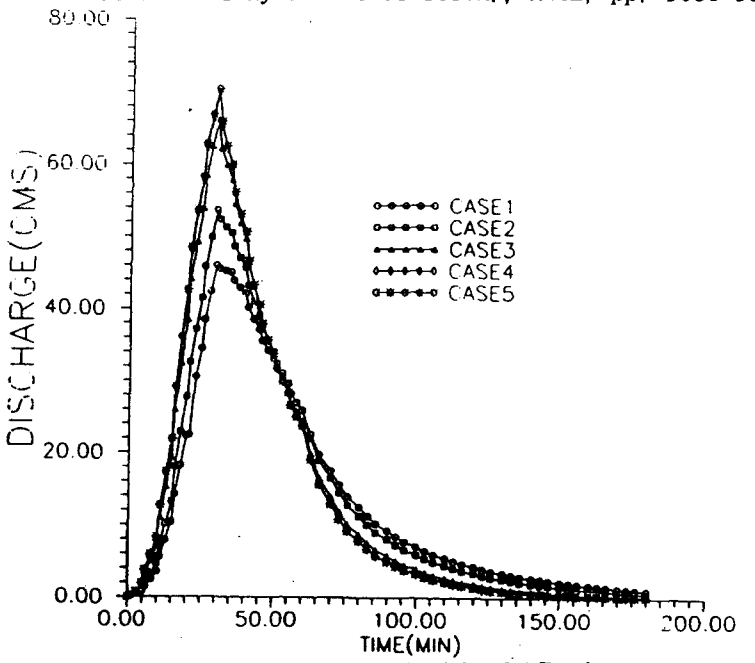

그림2 유역형태에대한 유출수문곡선

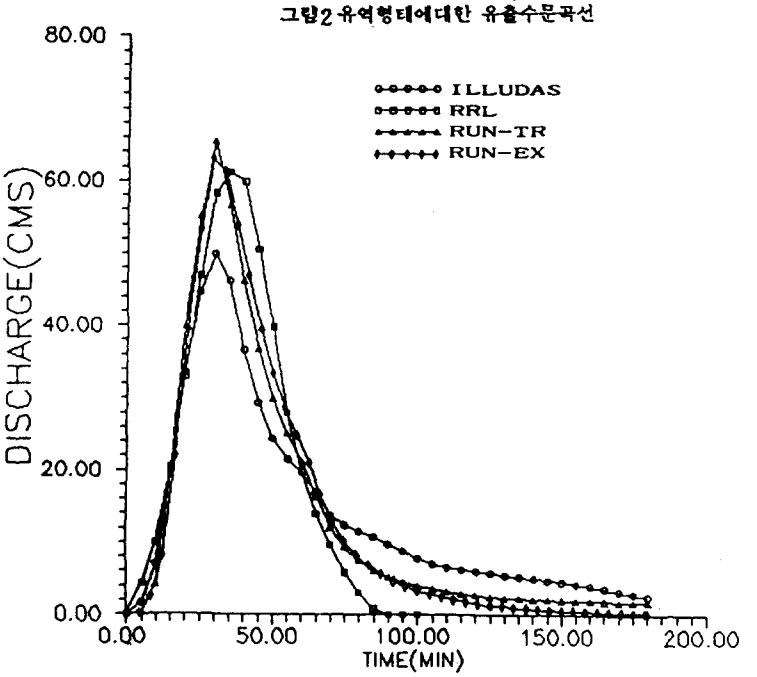

그림3 마포유역 모형별 유출수문곡선