

MIKE SWMM모형을 이용한 도시유역 유출분석에 관한 연구

Runoff Analysis of Urban Watershed using MIKE SWMM Model

김종석* / 안재현** / 문영일*** / 오태석****

Kim, Jong Suk / Ahn, Jae Hyun / Moon, Young-Il / Oh, Tae Suk

Abstract

For an urban watershed modeling, the ILLUDAS and SWMM model were the popular rainfall-runoff models using in Korea. However, combined sewerage systems in urban area produce some problems when a flood event happens because of the surcharged precipitation amounts which drain to streams directly. Also, lack of pipe line data and difficulties of modeling yield inappropriate modeling results in urban runoff analysis. In addition, rainfall-runoff models in an urban which using channel routing could be inaccurate and complicated processes. In this paper, the MIKE SWMM model has been applied for a stable urban area runoff analysis. Watershed and pipe line data were established by using past inundated records, DEM data and numerical pipe line data. For a runoff modeling, the Runoff block was adapted to a basin and the Extran block using dynamic equation was applied for sewerage system. After a comparisons against existing models yield that the MIKE SWMM model produce reliable and consistence results without distorting parameter of the model.

keywords : urban rainfall-runoff model, MIKE SWMM, parameter estimation

요 지

도시유역의 유출분석을 위하여 국내에서 많이 사용하고 있는 모형들로는 ILLUDAS, SWMM이 대표적이라고 할 수 있다. 그러나 국내의 대부분의 도시하천의 경우 합류식의 배수계통을 가지고 있어, 홍수시에 하수관거용량을 초과하는 우수량은 하천을 통해 배수가 되고 있다. 이러한 배수계통을 갖는 하천에 대하여 대상유역의 배수관망 자료 부족과 Modeling의 어려움으로 인해 도시유출모형이 아닌 HEC-HMS모형과 같은 유역추적법을 통해 유출분석이 이루어지고 있다. 또한 기존 논문에서 제시한 도시유출모형에 하도추적을 결합한 강우-유출 모의는 정확성 결여 및 번거로운 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 보다 안정적인 해석 모형인 MIKE SWMM 모형을 사용하여 과거 침수자료와 DEM 자료 및 수치 배수관망 자료를 통한 유역 및 배수관망 자료를 구축하고 유역에 대해서는 Runoff Block을 사용하고, 하수관거와 본류에 대해서는 Dynamic 방정식을 이용한 Extran Block을 적용하여 유출분석을 실시하고 그 결과를 기존의 방법들과 비교하여 각각의 장단점 및 적용성을 밝히고 개선방향 등을 제시하고자 하였다.

핵심용어 : 도시유출모형, MIKE SWMM, 매개변수추정

* 정회원, 서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (e-mail: jongsuk@uos.ac.kr)
** 정회원, 서경대학교 이공대학 토목공학과 교수
*** 정회원, 교신저자, 서울시립대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: ymoon@uos.ac.kr)
**** 정회원, 서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서 론

강우-유출 현상을 모의하기 위하여 지금까지 많은 모형들이 개발되고 적용되어 왔다. 그러나 자연현상의 불확실성 때문에 아직까지는 제한적으로만 가능할 뿐이며, 이의 개선을 위한 많은 노력들이 지금도 계속되고 있다. 특히, 도시유역에서는 소하천 및 지천들의 범람, 제방의 붕괴 등으로 인한 외수피해와 배수로, 하수도 및 펌프장의 배제능력 부족 등으로 인한 내수피해가 발생하고 있는데 이에 대한 물리적 거동에 기초한 합리적인 매개변수의 산정과 모형분석에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 도시유출 모형들을 적용하고 비교함으로써 유출분석을 위한 합리적인 방향을 제시하고자 한다.

도시유역의 유출분석을 위하여 국내에서 사용되고 있는 모형들로는 ILLUDAS와 SWMM이 대표적으로 사용된다. 그러나 대상유역의 배수관망 자료 부족과 모델링의 어려움으로 인하여 많은 지역에서 도시유출모형이 아닌 HEC-HMS 모형과 같은 유역추적법을 통한 유출분석이 이루어지고 있다. 또한, 하천정비기본계획수립시 유역추적법을 통한 유출분석 결과가 실측유량자료에 의한 매개변수의 검정없이 반영되어 하천이 과소 또는 과대 설계되는 문제점이 있다.

ILLUDAS 모형은 지표면의 양상과 배수관로의 계통을 고려하기 때문에 기존의 합리식과 RRL모형보다는 정확한 계산결과를 기대할 수 있다. 그러나 배수관망이 각종 수리구조물을 포함하고 있는 경우에는 정확한 유출분석을 할 수 있다고 보기는 어렵다. 또한 관로에서의 흐름을 등류로 보고 해석함으로써 관로내 수심의 변화와 배수의 영향을 고려할 수 없는 한계가 있다.

대부분의 도시하천은 합류식과 분류식이 혼재해 있는 형태로 홍수시에는 하수관거의 용량을 초과하는 우수는 하천을 통해 배수가 이루어진다. 이러한 특성으로 인하여 대부분의 도시하천의 설계에 있어서 일관된 배수관망의 구성을 통한 유출분석에 어려움이 따르며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원석연(1993), 송현섭(2001)은 도시유출모형에 하도추적모형을 결합하여 유출량을 산정하였다. 그러나 하도추적모형을 결합한 유출해석은 도시유출모형을 통한 완전한 해석이라 할 수 없으며 해석시에 매우 번거로운 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 보다 안정적인 해석 모형인 MIKE SWMM모형을 사용하여 중랑천의 지류인 우이천을 대상으로 과거 침수자료와 DEM 자료 및 수치 배수관망 자료를 통한 유역 및 배수관망 자료를 구축하였다. 우이천 유역에 대해서는 MIKE SWMM의 Runoff

Block을 사용하고, 하수관거와 본류에 대해서는 Dynamic 방정식을 이용한 Extran Block을 적용하여 유출분석을 실시하고 그 결과를 기존의 방법과 비교하여 각각의 장단점 및 적용성을 밝히고 개선방향 등을 제시하고자 하였다.

2. 강우-유출 모형

유역의 유출과정은 토지이용과 선형 수문사상 등에 따라 달라지는 매우 복잡한 양상을 띠며, 유역의 강우-유출관계가 비선형성을 내포하고 있어서 유역의 유출의 정확한 예측은 매우 어려운 문제이다. 따라서, 본 연구에서는 하천수계에서 홍수유출 예측정도를 높일 수 있는 방향을 제시하고자, 국내에서 대표적으로 사용되고 있는 강우-유출모형인 Clark 순간단위도법을 적용한 HEC-HMS 모형, 지표면의 양상과 배수관로의 계통을 고려한 ILLUDAS 모형, 유출모형과 하도추적 방법을 연계한 모형 그리고 MIKE SWMM모형의 구조 및 특성을 분석하고 예측능력을 비교 검토하였다.

2.1 HEC-HMS모형 (Clark의 유역추적법)

이 방법은 유역의 도달시간-누가면적 관계를 이용하여 자연하천유역에 내리는 순간단위유량을 유도하는 방법으로 유역의 출구에 1개의 선형 저수지가 존재한다고 가정하고 이 저수지로 매시간 구간별 유입량은 도달 시간 구간별 면적상에 내린 유효우량이 유량으로 환산된 값으로 하여 계산한다.

$$I_i = \frac{A_i \times 10^6}{\Delta t \times 3600 \times 100} = 2.78 \frac{A_i}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서 A_i 는 i 번째 시간구간에 포함되는 유역면적 (km^2)이다. 저류량은 구간 상류단에서의 유입량과 하류단에서의 유출량의 차이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta T - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = S_2 - S_1 \quad (2)$$

여기서 첨자 1,2는 추적시간 Δt 의 시작과 끝을 표시한 것이다. 또 유역을 선형저수지라고 가정하였으므로 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다. 여기서, S 는 저류량 K 는 저류상수 O 는 유출량을 나타낸다.

$$S = KO \quad (3)$$

Eq. (2), Eq. (3)에서

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = K(O_2 - O_1) \quad (4)$$

Eq. (4)를 O_2 에 관해서 정리하면

$$O_2 = \frac{0.5 \Delta t}{K + 0.5 \Delta t} \times I_2 + \frac{0.5 \Delta t}{K + 0.5 \Delta t} \times I_1 + \frac{K - 0.5 \Delta t}{K + 0.5 \Delta t} \times O_1 \quad (5)$$

Eq. (5)를 통하여 축차적으로 계산을 실시함으로써 전체적인 유출량 곡선을 구할 수 있다.

2.2 ILLUDAS 모형

ILLUDAS모형은 1974년 Terstriep과 Stall에 의해 처음 개발되었으며, 1984, 1986년에 수정된 도시유출모형이며, RRL모형의 개정판이다. ILLUDAS모형은 RRL모형에서 제외되었던 간접연결 포장지역, 투수지역 및 유출에 기여하지 않는 유역 등의 4가지 지역으로 구분하여 모의하는 모형이다. 전체 유역은 여러 개의 소유역으로 구분하며, 구분은 하수관거를 설치하고자 하는 지점 또는 주요 간선관거의 합류지점을 기준으로 한다. 소유역마다 포장면적과 투수면적의 유출량을 계산, 합성하여 소유역별 유출수문곡선(hydrograph)을 구하고, 이를 관로를 통하여 추적, 합성하여 유역 최하단부에서 총유출수문곡선을 구하게 된다. ILLUDAS 모형은 유역을 직접연결 포장지역, 간접연결 포장지역, 직접연결 투수지역, 및 유출에 기여하지 않는 유역으로 구분하고 있다. 또한 이러한 4가지 유역에 대하여 손실량과 흐름 상태를 각각 구분하여 해석한다. 모형의 계산절차는 크게 다음과 같은 4가지 절차로 구분된다.

- 대상유역의 구분 및 소유역별 입력자료 결정
- 포장유역의 유출량 계산
- 투수유역의 유출량 계산
- 수문곡선(hydrograph)의 합성 및 관로의 추적(routing)

2.3 유출모형과 하도추적 방법을 연계한 모형

대부분의 도시하천은 합류식과 분류식이 혼재해 있는 형태로 홍수시 하수관거의 용량을 초과하는 우수는 하천을 통해 배수가 이루어진다. 이러한 특성으로 인하여 대부분의 도시하천의 설계에 있어서 일관된 배수관

망의 구성을 통한 유출분석에 어려움이 따르며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유출 모형과 하도추적 방법을 연계한 모형이 사용된다. 본 연구에서는 동일 유출구로 배수되는 소유역별로 각각의 유출량을 산정하고 주 하도에 대해서 하도추적을 개념적으로 잘 표현해 주는 수리학적 하도추적 방법인 Muskingum-Cunge 및 Kinematic Wave 방법을 이용하여 강우-유출량을 산정하였다. 또한, 대부분이 산지유역에 해당하여 비 도시화된 유역으로 다른 유역에 비해 강우에 따른 유출이 관거의 영향을 매우 적게 받고 있다고 판단되는 유역에 대하여 단일 사상 강우-유출 모형인 HEC-HMS(Clark 단위도)로 모의하고 유출 모형과 연계하여 주 하도를 Muskingum-Cunge 및 Kinematic Wave 방법을 이용하여 강우-유출량을 산정하였다.

2.4 MIKE SWMM 모형

MIKE SWMM은 사용자 편의 인터페이스와 첨단 모의기술, 그리고 다양한 시각화의 우수성을 두루 갖춘 세계적으로 광범위하게 적용 될 수 있는 수리 모형이다. 또한 MIKE SWMM은 북미지역에서 선택 기준이 되어 현재 널리 사용되고 있는 SWMM과 전 세계적 사용자 인터페이스방식인 MIKE의 결합으로 이루어 졌으며, 도시유역 우수 및 오수 처리 시스템의 보다 정확한 해석과 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있는 프로그램이다. MIKE SWMM 모형은 U.S. EPA의 Storm water Management Model(SWMM)을 기반으로 Graphical User Interface(GUI)를 보완했으며, 그 특징 중 하나는 사용하기 쉬운 그래픽 인터페이스를 통해 복잡한 수리·수문 현상과 수질 모의를 동시에 할 수 있다는 것이다. 또한 기존의 SWMM모형에서 처리하기 힘든 관망 요소를 사용자가 원할 경우 언제든지 추가, 삽입, 삭제, 이동할 수 있도록 지원하며 개념모형을 자동으로 갱신한다. MIKE SWMM은 관망 자료를 저장하거나 연산할 때 Microsoft사의 ODBC 데이터베이스를 사용한다. 이러한 방법을 사용하면, 기존의 SWMM모델에서 제한되어 있는 하수도 모델 자료를 무제한적으로 정의하거나 변환할 수 있으며 하천의 횡단면 자료등 실측자료를 데이터베이스 형태로 추출할 수 있기 때문에 실제 유역 특성에 맞는 유출분석을 위한 모델링이 가능하다. MIKE SWMM은 링크-절점을 기반으로 하는 모델로서, 하수처리장과 수질제어장치가 포함된 오수수 배수 시스템에 대하여 수문, 수리, 수질 분석을 수행할 수 있다. 링크는 수리학적 요소를 표현하는데 쓰이는데 파이프, 수로, 펌프, 스탠드파이프(stand pipe), 암거, 위어 등이 그 예이다. 이외에도 MIKE SWMM에서 지원하

는 링크 요소의 종류는 매우 많다. 절점은 두 개 혹은 그 이상의 링크가 만나는 지점이나, 유수 및 오염원이 시스템 내로 유입되는 지점, 또는 유수지, 정수지, 호수 등과 같은 저류 요소를 표현하는데 쓰인다. MIKE SWMM을 사용하여 모의할 수 있는 분야에는 합류식 하수도 월류수 (Combined Sewer Overflows, CSO), 분 류식하수도 월류수 (Sanitary Sewer Overflows, SSO), 상호연결된 저수지 분석, 개방형 및 폐쇄형 하수도내 흐름 분석, 도시배수시스템 설계, 기존 오우수관 시스템 분석 등 도시배수시스템에 관련된 모든 분야가 포함된다. MIKE SWMM은 비선형저수지추적 (Runoff Modeling)과 수리학적 분석을 수행할 수 있는 완벽한 수리동역학적홍수파추적 (Extran Modeling)을 모두 제공한다. Runoff Modeling은 지체효과(translation effect)와 감쇠효과(attenuation effect)를 고려하는 수로와 파이프에서의 비선형저수지추적모델로서, 수표면은 인버트의 경사와 평행하다고 가정한다. 그러나 이 방법은 배수(backwater) 현상이나 역류현상을 모의할 수 없는 단점이 있다. 반면, Extran Modeling은 대상 배수관망에 대하여 St. Venant 방정식의 해를 구하여 배수현상, 역류, 순환연결, 관수로 흐름, 조석의 영향을 받는 하구, 상호연결된 저류지 등에 관한 모의를 수행할 수 있다. 또한 저류지, 정수지, 호수 등 다양한 저류 요소를 지나 는 흐름도 추적할 수 있다.

2.4.1. 비선형 저류방정식을 이용한 지표류(overland flow)산정

Runoff 블록에서 지표면 유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 Kinematic Wave 근사법인 비선형저류방정식이 사용된다. 계산을 수행하는 때는 상류부 경계조건만이 필요하고, 각 수로 요소는 다른 요소에 대해 독립적인 계단형 수로로 가정한다. 각 연산구간 dt에서 두개의 미지수 유량 Q와 수심 d가 존재하며 이를 위한 두개의 방정식이 구성된다.

소유역에서의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A_s i - Q \quad (6)$$

여기서, V는 물의 체적 (=A · d), d는 수심(m), t는 시간(sec), A_s는 수표면 면적(m²), i는 초과 강우량(m/sec), Q는 유출량(CMS)을 나타낸다. 지표면유출은 유역면적을 광폭으로 보아 수리반경이 수심과 같다는 가정아래 Manning방정식을 사용하여 계산한다.

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (7)$$

Eq. (7)에서, W는 유역의 폭(m), n은 Manning의 조도계수, d_p는 지면저류 깊이(m), S는 소유역 경사(m/m)이다. 미지값 d를 계산하기 위해 Eq. (6)을 Eq. (7)에 대입하여 정리한 비선형 저류방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = i - \frac{W}{An} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} = i + R \cdot (d - d_p)^{5/3} \quad (8)$$

여기서, R은 유역폭, 경사, 조도계수 등을 하나로 표현한 변수로서 유역의 특성에 따라 변화하는 유역특성 인자이다. Eq. (8)은 다음의 차분식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{(d_{n+1} - d_n)}{\Delta t} = i + R \cdot \left(d_n + \frac{(d_{n+1} - d_n)}{2} - d_p \right)^{5/3} \quad (9)$$

Eq. (9)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 풀이되며, 미지수심 d_{n+1}이 계산되면 각 연산구간에서 순간 유출(WFLOW)을 계산하게 된다.

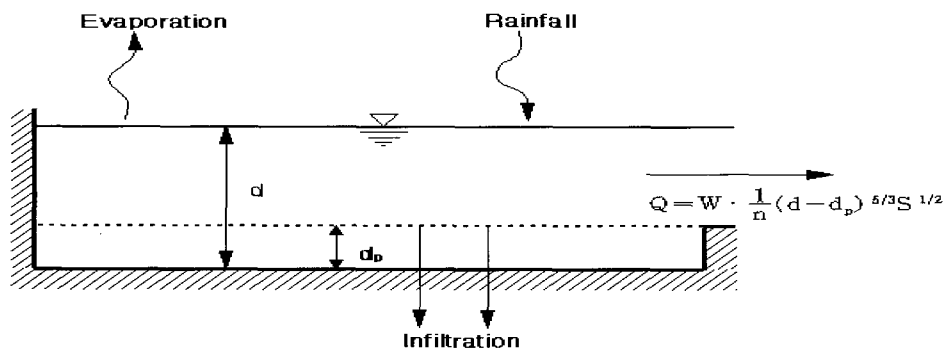


Fig. 1. Routing Scheme of Overland Flow (Huber and Dickinson, 1988)

Eq. (9)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 풀이되며, 미지수집 d_{n+1} 이 계산되면 각 연산구간에서 순간 유출(WFLOW)을 계산하게 된다.

2.4.2. Dynamic wave를 이용한 하도 추적

Extran 블록에서는 Dynamic Wave를 이용한 하도추적(channel routing)에서 흐름에 대한 기본방정식은 연속방정식과 개수로에서의 일차원 점면 부정류 방정식으로서 다음의 St.Venant 식을 사용한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (11)$$

수심이 얇은 흐름에 있어서 이송항($\partial(Q^2/A)/\partial x$)은 운동량방정식 계산시 생략하게 되는데, 이 항이 운동량방정식의 여러 항 들 중에서 가장 작은 값을 갖는 동시에 결과치에 불안정한 요인을 제공하기 때문이다 (Yen, 1981). 따라서, 간편하고, 안정된 해를 구하기 위해 Eq. (12), (13)으로부터 Eq. (10)을 변형시킨다.

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (12)$$

$$\frac{\partial(V^2 A)}{\partial x} = 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (13)$$

Eq. (12), (13)을 Eq. (11)에 대입하고 정리하면 종속변수 Q, A, V, H 등을 갖는 운동량방정식 Eq. (17)을 얻게 된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (14)$$

Eq. (10)에 $Q = AV$ 를 대입하고 정리하면,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

이 Eq. (15)에 V를 곱하고 정리하면,

$$AV \frac{\partial V}{\partial x} = -V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (16)$$

Eq. (16)을 Eq. (14)에 대입하여 정리하면 하도 추적에 사용되는 다음의 기본방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} \\ - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

3. 모형의 적용

3.1. 대상유역 및 모형의 입력자료

본 연구의 대상유역은 중랑천 제1지류로서 유역면적 27.67km², 유로연장 11.75km인 우이천 유역(Fig. 2)이다. 이 지역은 1998년과 2001년 홍수피해가 심했던 곳으로 재해관리상 지속적인 모니터링이 필요한 유역이다. 본 연구에서 사용한 수문자료는 2000년~2004년도 강우자료와 수위-유량자료를 이용하였고 서울특별시의 「우이천 등 4개 하천정비기본계획보고서(2004)」와 배수계통도 및 서울시 GIS 자료를 이용하여 구간별 평균 하폭, 경사, 조도계수 등을 산정하였다. 그리고 우이천 본류를 주 하도로 하고 유역특성을 고려하여 총 9개의 배수분구를 중심으로 각각의 소유역을 구분하였다. 다음 <Fig. 3>은 MIKE SWMM모형의 RUNOFF+EXTRAN Block을 통한 유출량 산정 모식도를 <Fig. 4>는 관망구성도를 나타내고 있다.

3.2. 유출모형의 매개변수 추정

모형의 매개변수를 보정하는 방법에는 시행착오에 의한 수동보정(Manual Calibration)과 최적화 기법을 사용하는 자동보정(Automatic Calibration)으로 구분되며, 대부분의 수문모형의 보정에서는 이들 두 방법을 병용하여 실시한다. 본 연구에서는 관측된 호우사상에 대한 강우 및 유출량 자료를 이용하여 HEC-HMS모형에서는 매개변수의 최적화(Optimization)기법을 사용하였고, 이때 목적함수유형은 Peak-Weighted RMSE(Root Mean Squared Error)를, 목적함수를 찾아가는 기법으로는 Univariate Gradient 방법을 사용하였다. 또한, ILLUDAS 모형과 MIKE SWMM 모형에서는 다른 매개변수들을 고정하고 분석 대상 매개변수를 -90%에서부터 90%까지 10%씩 증감시켜 기준 모형에 대한 침투시간, 침투유량의 증감비를 분석하여 모형에 대한 매개변수를 추정하였다.

3.2.1. 민감도 분석

ILLUDAS의 매개변수인 RUFFN(사용관거의 Manning

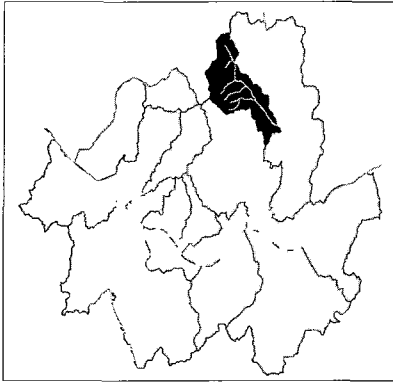


Fig. 2. Ui-River Basin

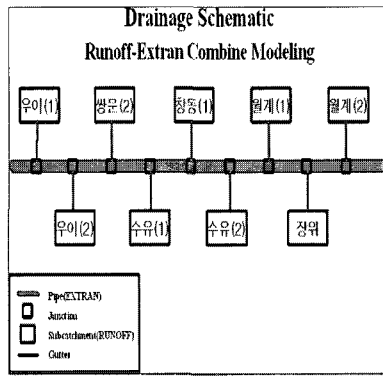


Fig. 3. Structure of MIKE SWMM

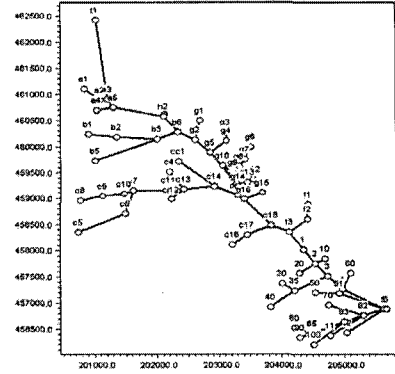


Fig. 4. Pipe Network of MIKE SWMM

계수), DIST(구간길이), SLP(구간관거의 경사), PSPA(간접연결 포장비율), PL(포장지역의 유로길이), PS(포장지역의 표면경사), GL(포장지역의 유로길이), GS(초지지역의 표면경사)에 대하여 -90%에서부터 90%까지 10%씩 증감시켜 기준 모형에 대한 침투시간, 침투유량, 총유출량의 증감비를 조사·분석하였다. 각 매개변수별 침투시간, 침투유량에 대한 분석결과는 <Fig. 5>와 <Fig. 6>과 같다. 침투시간에 대하여 ILLUDAS는 증감이 거의 없게 나타났으며 침투유량에 대하여는 PSPA, RUFFN, GS, PL, PS 순으로 민감도가 크게 나타났다.

MIKE SWMM의 민감도 분석은 우이천 유역 모형에 대하여 매개변수인 GLEN(관 길이), G3(하도경사), G6(하도 및 관망의 Manning 계수), WSLOPE(유역 평균경사), WSTORE1(불투수 지역의 표면저류), WSTORE2

(투수지역의 표면저류), WW(1)(유역폭), WW(5)(불투수 지역의 Manning 계수), WW(6)(투수 지역의 Manning 계수)에 대하여 실시하였는데, 다른 매개변수들을 고정하고 분석 대상 매개변수를 -90%에서부터 90%까지 10%씩 증감시켜 기준 모형에 대한 침투시간, 침투유량, 총유출량의 증감비를 조사·분석하였다. 분석을 실시한 매개변수들 중 WSTORE1, WW(5)는 타 매개변수에 비해 침투시간, 침투유량, 총유출량에 대한 영향이 매우 작게 나타나 이를 제외하고 나머지 매개변수에 대하여 도시·분석하면 아래와 같다.

침투시간, 침투유량 및 총유출량의 기준 값에 대한 증가에 따른 증·감 경향 및 각 매개변수별 민감도 크기별로 나열하면 <Table 1>과 같다. 아래의 <Fig. 7>과 <Fig. 8>은 매개변수별 민감도를 도시한 것이다.

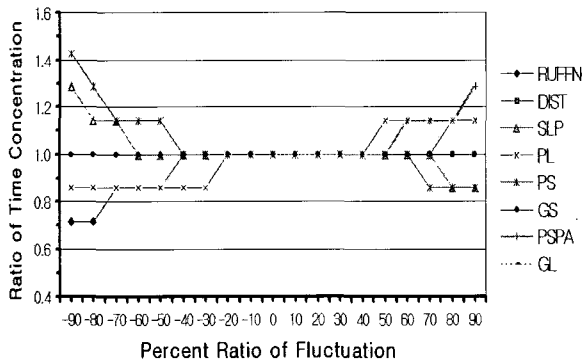


Fig. 5. Sensitivity of Peak Time for Parameters

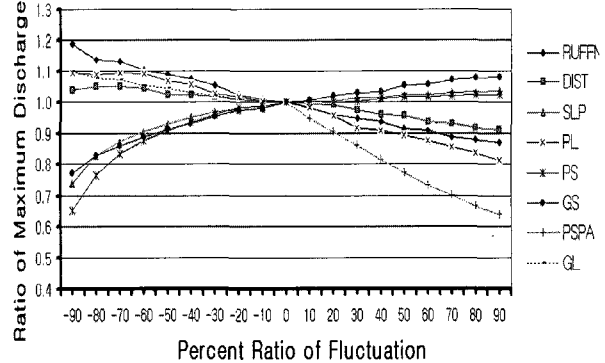


Fig. 6. Sensitivity of Peak Discharge for Parameters

Table 1. Sensitivity Ranking of MIKE SWMM Model

Sensitivity Ranking	Peak Time	Peak Discharge	Total Runoff Volume
1	G6 (↑)	G6 (↓)	WSTORE2 (↓)
2	G3 (↓)	G3 (↑)	WW(6) (↓)
3	GLEN (↑)	WSTORE2 (↓)	WSLOPE (↑)
3	WW(6) (↑)	WW(6) (↓)	G6 (↓)
4	WSLOPE (↓)	GLEN (↓)	G3 (↑)

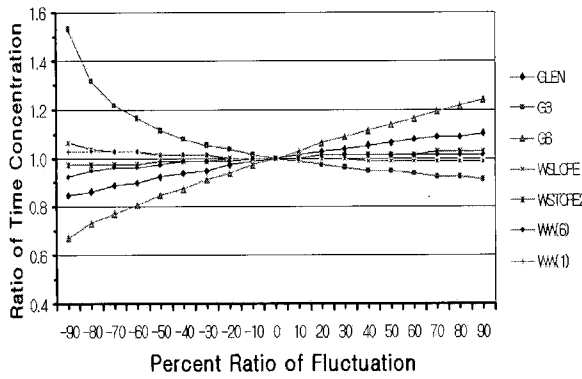


Fig. 7. Sensitivity of Peak Time for Parameters

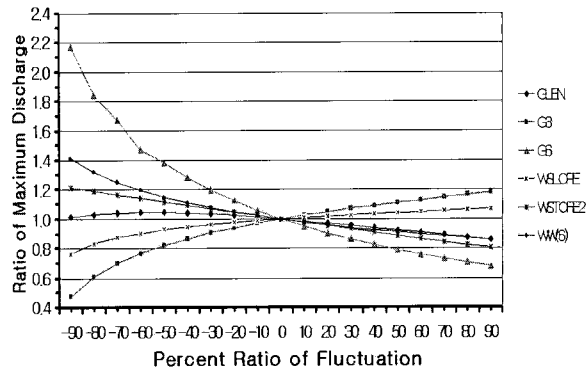


Fig. 8. Sensitivity of Peak Discharge for Parameters

3.2.2. 모형의 적합성 분석

일반적으로 강우-유출 모형의 정확성을 평가하기 위한 많은 통계적 적합도 기준이 제안되었으나, 적합도 기준보다는 모의 발생된 값과 측정된 값 사이의 불일치에 더 중점을 두고 있다. 즉 관측치와 예측치 사이의 차이인 잔차의 분석이 계통적으로 과소 또는 과대 추정되는 것을 파악하여 모형 수행능력을 평가하는데 사용되고 있다. 본 논문에서는 통계적 평가 수단으로 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 무차원 계수인 Eq. (10)과 같은 모형 효율성 계수 (CME: Coefficient of Model Efficiency)와 Eq. (19)에서 Eq. (21)과 같은 무차원 계수로서 첨두유량의 %오차 (PEP: Percent Error of Peak)와 유출용적의 %오차 (PEV: Percent Error of Volume) 및 첨두유량 발생시간(Tp)의 %오차 (PETP: Percent Error of Time of Peak)를 적용하여 모형의 적합성을 평가하였다. 모형효율성계수는 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 통계적 기준으로 편의를 줄일 수 있는 무차원계수이며 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치할수록 1에 가까워지는 성질이 있다.

이 기준은 무차원양으로서 자료의 개수에 관계없이 절대적 평가기준이 될 수 있다.

$$CME = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (18)$$

여기서 $F^2 = \sum_{i=1}^n [q_0 - q_i]^2$ 이고 $F_0^2 = \sum_{i=1}^n [q_0 - \bar{q}]^2$ 이다. F^2 는 실측치와 예측치 사이의 “불일치 지표”이고, F_0^2 는 “실측유량의 초기분산”을 나타내며, q_0 는 실측유량을 q_i 는 모의 유량을 나타낸다.

$$PEP = \frac{q_{ps} - q_{p0}}{q_{p0}} \times 100 \quad (\%) \quad (19)$$

$$PEV = \frac{V_c - V_0}{V_0} \times 100 \quad (\%) \quad (20)$$

$$PETP = \frac{T_{pc} - T_{p0}}{T_{p0}} \times 100 \quad (\%) \quad (21)$$

여기서, q_{ps} 와 q_{p0} 는 예측 및 실측 첨두유량이고 V_c 와 V_0 는 예측 및 실측 유출용적이며 T_{pc} 와 T_{p0} 는 예측 및 실측 첨두유량의 발생시간이다. 다음 <Table 2>는 적용강우사상에 따른 통계적 지표를 각각의 모형에 대해 분석한 결과이다.

Table 2. Statistical Index of Rainfall-Runoff Relationship

Applied Model	Rainfall Event (01/07/30)				Rainfall Event (03/07/22)			
	CME	PEP (%)	PEV (%)	PETP (%)	CME	PEP (%)	PEV (%)	PETP (%)
Model I	0.60	-2.63	- 2.47	28.57	0.71	-1.80	- 4.93	8.33
Model II	0.69	-3.20	-11.19	-14.29	0.52	-5.87	-22.35	-8.33
Model III	0.95	-0.10	- 3.46	4.29	0.61	4.35	- 9.67	-4.17
Model IV	0.78	0.31	8.52	-	0.67	-3.33	2.56	7.50
Model V	0.96	0.27	4.29	4.29	0.77	3.01	- 2.01	-4.17
Model VI	0.61	3.78	1.57	-7.14	0.65	0.97	- 2.35	-
Model VII	0.96	0.36	19.70	12.86	0.85	-0.84	-17.08	-

Model I: HEC-HMS(Clark Method), Model II: ILLUDAS, Model III: SWMM + Muskingum-Cunge

Model IV: SWMM + Kinematic Wave, Model V: SWMM + HEC-HMS + Muskingum-Cunge

Model VI: SWMM + HEC-HMS + Kinematic Wave, Model VII: MIKE SWMM

강우-유출 모의의 적합성을 평가하기 위해서 <Fig. 9>~<Fig. 15>에 실측치와 모의 결과를 도시적으로 분석하였다. 또한, 통계적 평가 수단으로 모형 효율성 계수 (CME: Coefficient of Model Efficiency), 첨두유량의 %오차 (PEP: Percent Error of Peak), 유출용적의 %오차 (PEV: Percent Error of Volume) 및 첨두유량 발생시간(Tp)의 %오차 (PETP: Percent Error of Time of Peak)를 적용하여 모형의 적합성을 평가하였다.

위의 <Table 2>의 통계적 지표에서 보는바와 같이 연계모형이 단일모형을 적용하였을 때보다 첨두유량의

발생시간, 첨두유량에서 비교적 우수한 결과를 보였다. 그러나 모형구성의 번거로운 단점이 있는 것으로 나타났다. MIKE SWMM의 RUNOFF+EXTRAN Block을 통해 모의한 결과는 모형효율성계수가 거의 1에 가깝게 산정되어 수문곡선의 형상적인 예측뿐만 아니라 첨두시간과 첨두유량의 모의에서도 우수한 것으로 나타났다. 또한, 기존의 유출모형과 하도추적을 결합한 방법보다 매개변수를 크게 왜곡시키지 않고 번거롭지 않으며 배수분구별 유역과 관로를 구성하는 등의 일관된 Modeling을 통해 실측치와 근접한 결과를 나타내었다.

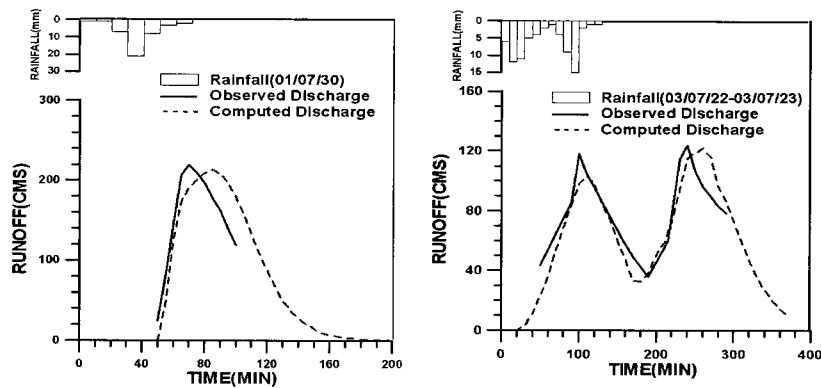


Fig. 9. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of HEC-HMS

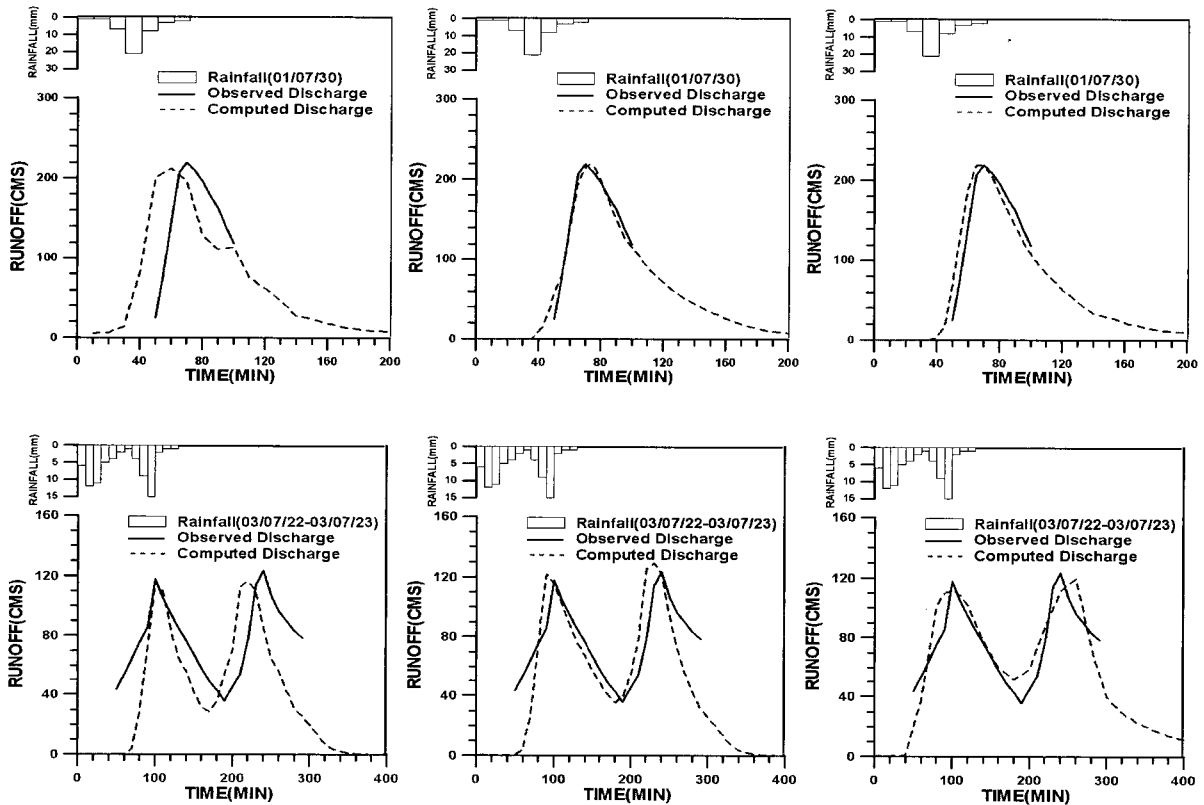


Fig. 10. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of ILLUDAS

Fig. 11. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of SWMM+M.C

Fig. 12. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of SWMM+K.W

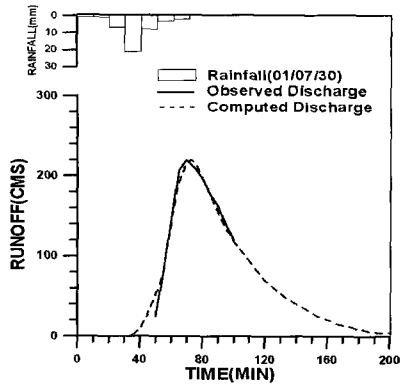


Fig. 13. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of SWMM+HEC-HMS+M.C

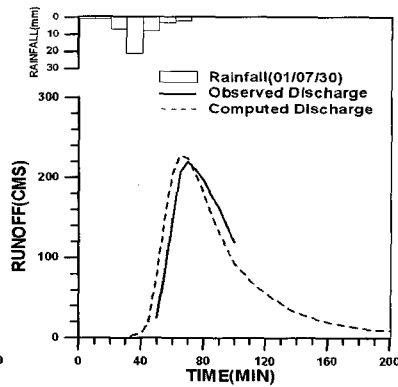


Fig. 14. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of SWMM+HEC-HMS+K.W

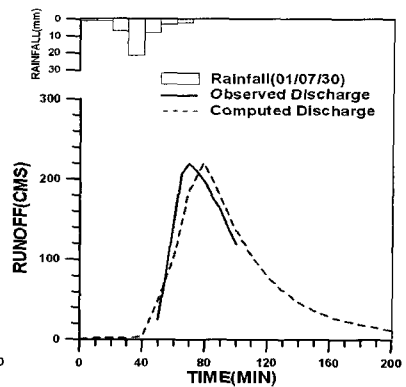


Fig. 15. Comparison of Observed and Simulated Runoff Results of MIKE SWMM

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 기존의 각 하천수계에 대해 홍수유출분석을 위해 많이 사용하고 있는 모형들과 MIKE SWMM모형을 선정하여 예측의 정확도를 기준으로 비교 검토하였다.

강우-유출분석을 위한 모형은 HEC-HMS, ILLUDAS 그리고 MIKE SWMM 등 3개의 단일모형과 유출모형과 하도추적 방법을 연계한 4가지 모형을 적용하였다. 각 방법별 모의분석결과를 관측수문곡선과 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 연계모형이 단일모형을 적용하였을 때보다 첨두유량의 발생시간, 첨두유량의 예측에 있어서 비교적 우수한 것으로 분석되었다. 특히, 강우에 따른 유출이 관거의 영향을 적게 주는 상류유역에 대해서는 HEC-HMS(Clark 단위도)로 모의하고 유출 모형과 연계하여 주 하도에 대해서 Muskingum-Cunge방법을 사용한 연계모형은 유역의 유출특성에 맞게 유출모의를 할 수 있기 때문에 첨두시간과 첨두유량에서 우수한 결과를 보였다. 그러나

모형 구성이 복잡하고 번거로운 단점이 있으며 그에 따른 매개변수의 보정에도 어려움이 있는 것으로 나타났다.

- 2) 실무에서 많이 사용하고 있는 유역추적법을 적용한 HEC-HMS 모형의 경우 첨두유량에는 큰 차이가 없으나 첨두시간의 경우 실측유량의 첨두시간과 비교할 때 10% ~ 30%정도 지체되는 것으로 나타났다. 이는 우수 관거를 통한 유출이 고려가 되지 않기 때문이라 판단된다.
- 3) ILLUDAS모형에 의해 모의 산정된 수문곡선을 관측치와 비교한 결과 첨두유량과 첨두시간에 대해서 다소 작게 추정되는 경향이 있었다. 또한, 첨두시간에 대하여 추적시간 간격이 입력강우의 시간 간격에 의해 정해져 있으므로 비교적 소폭의 증감에 대하여 세밀한 추정이 어렵고 첨두시간 이후 수문곡선의 감쇠부를 잘 모의하지 못하는 것으로 나타났다.
- 4) MIKE SWMM모형은 <Table 2>에 통계적 지표에 나타났듯이 모형효율성계수가 거의 1에 가깝게 산정되었으며, 이는 모의된 수문곡선이 실측 수문

곡선과 잘 일치함을 보여준다. 또한, 첨두유량 퍼센트 오차는 $\pm 1\%$ 내외로 실측치와 비슷한 값을 나타내어 좋은 모의 결과를 나타내었으며 배수분구 별로 유역과 관로를 구성하기 때문에 실제의 유출 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

5) 그러나, MIKE SWMM의 보다 신뢰성 있는 결과의 도출과 실제 업무에의 적용을 위해서는 동일 유역의 관측된 강우-유출자료를 바탕으로 지속적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2004년도 서울시립대학교 학술연구용 첨단장비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

김종석 (2004). 도시하천의 범람해석에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교

서울특별시 (2004). **우이천 등 4개 하천정비기본계획 보고서**.

서울특별시 (2003). **대학과 연계한 하천관리에 대한 연구 보고서(4차)**. pp. 8-21.

송현섭 (2001). 우이천 실험유역에 대한 유출 모형 매개변수 추정, 석사학위논문, 서울시립대학교

서울특별시 (1999). **우이천·도봉천 치수대책수립 및**

실시설계보고서.

한국수자원학회 (1996). 제4회 수공학 Workshop.

원석연 (1993). 유역 및 하도 홍수추적 방법을 결합시킨 도시유출해석모형. **수자원학회발표회논문집** pp. 319-326.

Roesner, Larry A (1992). Storm Water Management Model User's Manual Version 4.0 EXTRAN ADDENDUM, Univ. of Florida.

Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). Storm Water Management Model User's Manual. Version4, EPA, GA.

Engman, E.T. (1986). Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 112, no. 1, pp. 39-53.

Patry, G.G., and Marino, M.A. (1983). Nonlinear Runoff Modelling : Parameter Identification, *J. Hydraulic Division*. ASCE, pp. 865-880.

Yen, B.C (1981). Urban Stormwater Hydraulics and Hydrology, WRP, pp. 547.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting Conceptual Models Part I- A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290

(논문번호:05-65/접수:2005.05.10/심사완료:2005.09.22)