

# SWMM의 수정유역폭식 개발

## Development of Adjusted Subcatchment Width Equation in SWMM

배 덕 효\* / 장 민 석\*\*

Bae, Deg-Hyo / Jang, Min-Seok

### Abstract

The objectives of this study are to deduce a problem of existing subcatchment width equation in Storm Water Management Model(SWMM) and to analyze the suitability of a new adjusted subcatchment width equation on both ideally assumed watersheds and an actual urban watershed area. The problems of existing subcatchment equation are issued on the theoretical review of the equation and from the model application on different types of simplified assumed watershed. The adjusted equation, proposed in this study, that considers the pipe flows in addition to the surface flows on small subcatchment can improve the limitation of existing equation when applied on the assumed watersheds. Also, Gunja watershed with 96.3 ha is selected and collected rainfall-runoff events for the feasibility study of the proposed equation on actual urban watershed area. The results represent that the simulated flows from adjusted equation rather than the simulated flows from existing equation are well agreed with observed ones.

**keywords** : SWMM, Adjusted subcatchment width equation, Gunja experimental watershed, Urban runoff

### 요 지

본 연구에서는 Storm Water Management Model(SWMM)의 기존 유역폭식의 문제점을 도출하고, 새로운 유역폭식을 개발하여 그 적합성을 가상유역 및 실제유역에 적용하여 분석·제시하였다. 기존 유역폭식의 문제점을 도출하기 위해 유역폭의 이론적 거동특성을 규명하고, 이를 간략화된 가상유역에 적용하여 분석하였다. 본 연구에서 제시한 수정유역폭식은 소유역의 지표면 흐름뿐 아니라 관의 흐름을 고려한 것으로 가상유역에 적용한 결과 기존 유역폭식의 문제점을 개선할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 실제유역에서 개발된 수정유역폭식의 적합성을 검증하기 위해 96.3 ha에 해당하는 군자배수구역 시범지역으로 선정하여 강우사상에 따른 유출량 자료를 실측하였다. 실측된 강우-유출사상에 대해 수정유역폭식을 적용한 결과, 기존 유역폭식보다 보다 정확히 유출을 모의할 수 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : SWMM, 수정유역폭식, 군자시험유역, 도시유출

\* 세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 교수·공학박사

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong univ., Seoul 143-747, Korea

\*\* 교신저자, 세종대학교 토목환경공학과 석사

Corresponding Author, Master, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong univ, Seoul 143-747, Korea

(e-mail: jangmss3@hanmail.net)

## 1. 서 론

최근의 급속한 도시화는 침투홍수량의 증가 및 도달 시간의 단축으로 인해 도시홍수 피해를 날로 증가시키는 경향이 있다. 이와 같은 도시홍수 피해를 최소화하기 위해서는 수공구조물의 건설과 같은 구조적 대책과 홍수예보 시스템의 운영과 같은 비구조적 대책 마련이 필요하다. 이러한 대책을 수립하기 위해서는 도시지역의 다양한 유출특성을 고려한 홍수량 산정이 기본이 된다. 일반적으로 도시지역에서의 홍수량 산정은 합리식, ILLUDAS, Storm Water Management Model(SWMM)과 같은 도시유출 해석모형을 통해 수행되어 왔다. 특히, SWMM은 도시지역에서 강우사상으로 인한 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리 및 비용계산 등을 모의할 수 있어 다양한 분야에 응용되어 왔다. 이종태(1998)는 서울시 홍제천에 SWMM을 적용하여 모형의 적합성을 검증하였고, 이준우와 김성준(2001)은 SWMM을 도시 유역이 아닌 간척 담수호 유역에 적용하여 유역내 비점오염원의 배출을 모의한 바 있다.

SWMM을 도시유역에 적용할 경우, 모형의 매개변수 추정은 정확한 유출량 산정을 위해 중요하다. 이는 검증된 모형의 경우, 모형의 유출산정 정확성은 일반적으로 입력자료의 정확도에 의해 결정되기 때문이다. SWMM 모형 구축에 필요한 입력 자료는 유역폭, 조도계수, 저류깊이, 불투수율, 유역경사, 관망정보 등이 요구되며, 여기서 유역경사, 불투수율, 관망정보 등은 GIS자료 및 다양한 GIS 도구를 이용하여 비교적 객관적으로 산정이 가능하다. 또한, 조도계수와 저류깊이는 사진 관독 및 기존의 경험값을 이용하여 추정이 가능하다. 다만, 유역의 지형 형태를 반영하는 요소인 유역폭은 사용자의 주관적인 유역분할 방법에 따라 많은 차이를 보인다(정중호와 윤용남, 2007).

따라서 본 연구에서는 SWMM의 적용시 발생하는 기존 유역폭식의 문제점을 분석·제시하고, 발생한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 수정유역폭식을 제안하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 SWMM의 이론적 검토 및 가상유역 적용을 통한 기존 유역폭식의 거동특성분석, 기존 유역폭식의 문제점 도출, 새로운 수정유역폭식의 유도, 가상유역 및 실제유역에 대한 적용을 통해 수정유역폭식의 적합성을 검증하고자 한다.

## 2. SWMM의 기본 개념

SWMM은 1971년 미국 EPA의 지원 아래 Metcalf

& Eddy사가 플로리다 대학 및 WRE(Water Resources Engineer)와의 공동연구로 도시유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발하였다. 또한, 1981년에는 SWMM 모형 내에 TRANSPORT 블록의 확장 및 보완을 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 SWMM 모형에 추가·보완하였다(이종태 등, 1996). 본 연구와 관련된 기본 개념을 간단히 기술하면 다음과 같다.

### 2.1 지표면 유출

SWMM에서 지표면을 통한 유출량은 유역을 비선형 저수지(nonlinear reservoir)로 가정한 후 연속방정식과 매닝 방정식을 사용하는 RUNOFF 블록에서 계산한다. Fig. 1과 같이 지표유출 발생유역의 초기 지표면 저류량은 0이고, 유역의 상류 끝 소유역에서는 외부유입이 없으며, 상류 유역에서 강우로 인해 발생하는 지표면유출은 수리학적으로 연결된 하류 유역에 유입되며, 다른 유역으로 유출되지 않는다는 경계조건을 가진다.

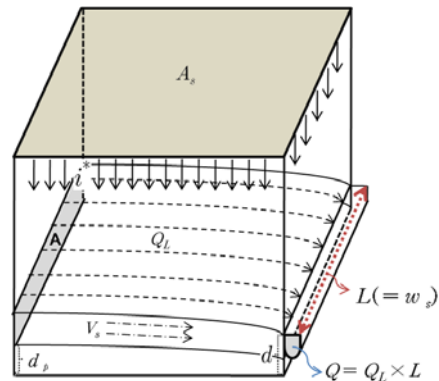


Fig. 1. Diagram of Surface Runoff in SWMM

$$\frac{dV_v}{dt} = A_s \frac{dd}{dt} = A_s \cdot i^* - Q \quad (1)$$

$$Q = (w_s \cdot Q_L) = A \cdot V_s = w_s \cdot (d - d_p) \cdot V_s \\ = w_s \cdot (d - d_p) \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = \frac{w_s}{n} \cdot (d - d_p)^{\frac{5}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $V_v (= A_s \cdot d)$ 는 소배수구역의 흐름체적,  $A_s (m^2)$ 는 표면적,  $d (m)$ 는 수심,  $i^*$ 는 유효우량(강우강도-증발 및 침투율, mm/sec),  $Q (m^3)$ 는 유출량,  $A$ 는 지표흐름 단면적( $m^2$ ),  $V_s$ 는 지표흐름 속도( $m/s$ ),  $L (= w_s)$ 는 유역폭,  $d_p$ 는 지면저류 손실수심,  $Q_L$ 는 단위폭당 유출량( $m^2/s$ ),  $n$ 은 매닝 조도계수,  $R$ 은 동수반경으로 광폭수로인 경우 수심과 동일,  $S$ 는 소유역 경사

를 나타낸다. Eq. (2)를 Eq. (1)에 대입하여 정리하면 다음 Eq. (3)과 같은 수심의 방정식을 얻는다.

$$\frac{dd}{dt} = i^* - W_I (d - d_p)^{\frac{5}{3}} \quad (3)$$

여기서,  $W_I (= \frac{w_s \cdot S^{1/2}}{A_s \cdot n})$ 는 유역특성에 따른 인자로써 유역폭, 경사 및 조도계수를 포함하고 있다. 수심  $d$ 는 Eq. (3)을 차별화하여 Newton-Rapson법으로 구할 수 있으며, 유량  $Q$ 는 Eq. (2)를 통해서 구한다.

## 2.2 유역폭

SWMM의 입력자료 가운데 유역의 지형학적 형상은 유역폭으로써 반영된다. Fig. 1과 같이 유역 형상을 나타내는 유역폭은 가상의 직사각형 유역에서 지표유출이 주관을 통해 하류로 유하한다고 가정할 때, 지표유출의 유입이 가능한 관의 총 길이를 의미한다. Fig. 1에서와 같이 유역출구에서의 유량( $Q$ )은 하도가 소배수구역의 한 쪽에 치우쳐 있을 때는 단위폭당 유량( $Q_L$ )에 관의 길이( $L$ )의 곱으로 정의되며, 만약 하도가 중앙에 위치할 때는 관을 중심으로 같은 단위폭당 유량( $Q_L$ )이 양쪽으로 유입됨으로  $2 \times L$ 로 정의할 수 있다. 따라서 SWMM에서는 관의 흐름을 고려하지 않기 때문에 같은 시간대의 지표유출량과 유출구에서의 유량은 같다. 즉, 유역출구유량( $Q$ )은 지표유출량의 합과 같다. 그리고 이때의 총 하도의 길이를 유역폭( $w_s$ )로 정의한다.

배수구역의 형상이 불규칙하고 관의 위치가 항상 가운데에 위치하는 것은 아닌 실제의 소배수구역을 직사각형 유역으로 가정한 경우, Eq. (4)와 Eq. (5)로 정의되는 왜곡도계수를 이용하여 유역폭을 산정한다.

$$S_k = \frac{|A_1 - A_2|}{A_s} \quad (4)$$

$$w_s = (2 - S_k) \cdot L \quad (5)$$

여기서,  $S_k$ 는 왜곡도 계수,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 각각 주 관로를 기준으로 양쪽의 소배수구역 면적( $m^2$ ),  $A_s$ 는 전체유역 면적( $m^2$ ),  $L$ 은 주 하도의 길이( $m$ ),  $w_s$ 는 유역폭( $m$ )이다. 관이 중앙에 위치하는 경우  $S_k$ 는 0이므로 유역폭은  $2 \cdot L$ 이 되지만, 관이 한쪽 끝에 위치하는 경우  $S_k$ 는 1이므로 유역폭은  $L$ 이며, 관이 1/3의 지점에 위치하는 경우  $S_k$ 는 1/3이므로 유역폭은  $5/3 \cdot L$ 이 된다.

## 2.3 배수관망 유출

일반적인 유출모델의 유역구성은 여러 개의 소유역을 하도로 엮어 하나의 유역으로 구성하게 되며, 이렇게 지표면 유량의 배수와 관망에 의한 배수 두 가지를 고려하는 모델을 이중배수시스템이라 한다. SWMM에서는 지표면 유량은 RUNOFF 블록의 지표면 유출방정식을 이용하여 계산하고, 관망에 의한 배수는 RUNOFF 블록 자체를 이용하거나 또는 관의 흐름을 보다 정확히 산정하기 위해 관망의 흐름만을 해석하는 독자적인 TRANSPORT와 EXTRAN 블록중 하나를 선택하여 해석할 수 있다. 본 연구에서는 부정류 해석을 통한 보다 정확한 배수관망 흐름해석이 가능한 EXTRAN 블록을 사용하였다.

EXTRAN 블록의 부정류 해석은 Link-Node 기법에 따라 해석한다. 일반적으로 소배수구역의 유출은 지표 흐름만이 고려되어 Node에 유입되고, 이렇게 유입된 유량은 Link로 연결되어 다음 Node에 합류되어 관망 해석을 한다. Link는 Node와 Node 사이를 연결하며, 이는 유량을 전송하는 관로와 같다. Link에서의 주요 수리특성치들은 조도계수, 관의 길이, 단면적, 동수반경과 수면폭 등이며, Link 내에서 중요한 독립변수는 유량( $Q$ )이다. Node는 배수시스템에서의 맨홀 또는 접합점 등과 같은 시스템내의 저류요소이다. Node와 관련된 변수들은 유량, 수위, 수표면적 등이며, 중요한 종속변수는 수위( $H$ )이다. Link에서의 운동량방정식 및 Node에서의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A_d S_f - 2V \frac{\partial A_d}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A_d}{\partial x} + g A_d \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = H_t + \frac{\sum Q_i \Delta t}{A_s} \quad (7)$$

여기서,  $A_d$ 는 관의 단면적( $m^2$ ),  $S_f$ 는 마찰경사( $m/m$ ),  $V$ 는 관의 흐름속도( $m/s$ ),  $H$ 는 수심( $m$ ),  $H_t$ 는 계산시간에서의 수위( $m$ ),  $Q_i$ 는 계산시간에서의 유량( $m^3/s$ ),  $\Delta t$ 는 계산시간 간격( $s$ ),  $A_s$ 는 Node에서의 수표면적( $m^2$ )이다.

## 3. SWMM의 유역폭 거동분석

### 3.1 유역폭-저류깊이-유량 상관관계

동일한 유역면적을 갖는 형상이 서로 다른 두 유역

에서 유역폭( $w_s$ )이 크면 침투유량이 증가하고, 유역폭( $w_s$ )이 작으면 침투유량이 감소하는 경향이 있다. 이는 Eq. (2)에서  $w_s$ 가 크면 순간 유출량을 크게 모의하기 때문이다. 그러나 Eq. (3)에서 나타난 바와 같이 유역폭은 저류깊이와 비선형 관계를 가지며, 이들 관계는 유량값에 직접적인 영향을 미친다. Fig. 2는 이들 관계를 규명하기 위해서 유역면적은 같지만 형상과 관의 위치가 다른 4 가상유역을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)는 관의 길이가 1,200m이고, 관이 중앙에 위치해 있으므로 Eq. (4)와 Eq. (5)로부터 유역폭은 2,400m로 산정되고, Fig. 2(b)는 동일 방식으로 계산할 경우 유역폭은 1,200m가 된다. Fig. 3은 이들 두 유역에 대한 SWMM에서의 유출량과 저류깊이의 변화를 도시한 것이다. 이때 강우는 유출이 평형상태에 도달할 때까지 강우강도 1mm/hr을 8시간 분포시킨 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유역폭이 큰 A\_유역의 유출수문곡선이 기울기가 급하게 상승하고 하강부 역시 먼저 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이때의 저류깊이는 Fig. 3(b)에서와 같이 작고 빨리 평형상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 SWMM에서의 유역폭과 저류깊이의 변화가 복합적으로 작용하여 유출량을 산정하기 때문에 유역폭이 두 배 크다고 침투량이 두 배로 커지지는 않는다. 유출량을 결정하는 저류깊이는 연속방정식 Eq. (3)을 통해 산정되는 값으로 유역폭이 큰 경우, 저류깊이를 작고, 빨리 평형상태에 도달하게 산정하고 반대로 유역폭이 작은 경우 저류깊이를 크고,

좀 더 늦게 평형상태에 도달하게 산정함으로써 유역폭에 상관없이 최종적인 유출 수문곡선이 평형상태에 도달할 때 유출량은 같게 된다.

유역폭의 물리적 의미는 일반적인 유역에서 하천 발달정도를 나타내는 수계밀도(Horton, 1940)와 연계하여 해석할 수 있다. 여기서 수계밀도는 유역내 전체 하천 길이를 전체 유역면적으로 나눈 값으로 정의된다. 수계밀도가 크다는 것은 단위면적당 하천 길이가 길다는 것으로 강우가 발생하였을 때 물이 지표면에서 빠르게 하천으로 유입된다고 볼 수 있으며, 이때 호우 응답은 빠르게 나타나고, 침투유량은 증가하게 된다. 이는 하천흐름은 지표면흐름보다 비교할 수 없을 정도로 빠르기 때문이다. 여기서 수계밀도는 유역폭과 비슷한 개념으로 생각할 수 있다. 같은 면적일 때 유역폭이 크다는 것은 그 만큼 지표면 흐름이 짧다는 것을 의미한다. Fig. 2와 같이 같은 면적일 때 유역폭이 크다는 것은 세로로 긴 유역을 의미하고, 이럴 경우, 지표흐름 길이가 짧고, 하도의 흐름은 늘어나게 돼서 호우응답은 빠르게 나타나게 되며, 침투유량은 증가하게 된다. 따라서 유역폭이 일정부분 유역형상을 반영하고 있다고 볼 수 있다. 그러나 이때의 유역폭은 하도흐름 자체를 완전히 무시한 경우이다. SWMM이 적용되는 도시지역은 대부분의 유역이 포장되어 있어 지표면흐름이 일반적인 자연유역 보다 유출흐름 속도가 빠르기 때문에 관의 흐름을 무시할 경우에 정확한 유출량 산정이 어려울 것으로 사료된다.

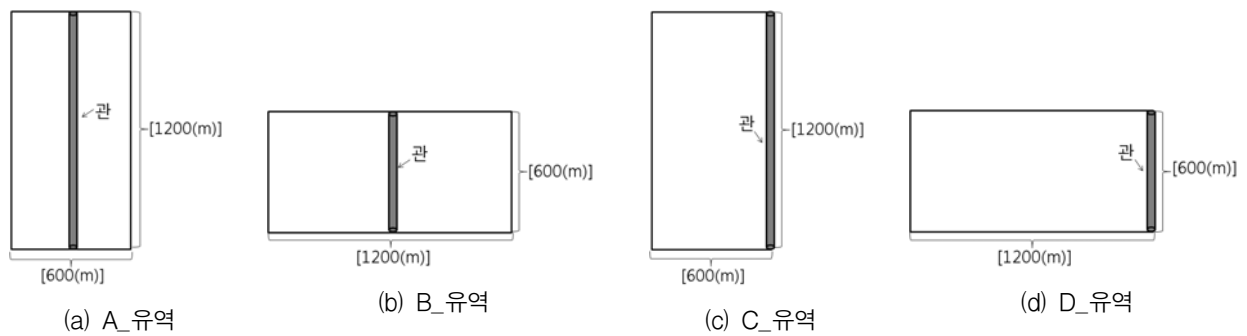


Fig. 2. Assumed Watersheds Depending on Watershed Characteristics

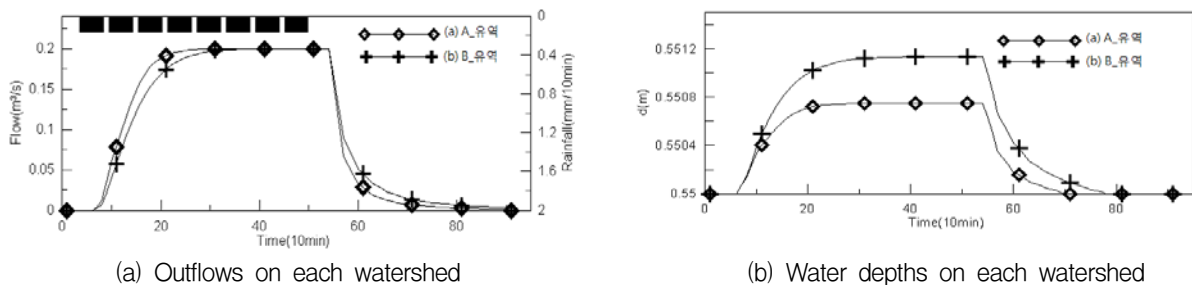


Fig. 3. The Outflows and Water Depths on Different Subcatchment Widths

### 3.2 유역폭식의 문제점

전술한 바와 같이 유역폭은 유역의 형상을 일정부분 반영하고 있지만, 소배수구역내 관의 흐름을 고려하지 않는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 Fig. 2의 4 가상유역(A\_유역, B\_유역, C\_유역, D\_유역)에서 분석하였다. 가상유역을 선택한 이유는 실제 유역에 SWMM 모형을 적용할 경우 유역폭 이외의 다른 매개변수들로 인해 유역폭이 유역의 형상을 어느 정도 반영하는지를 객관적으로 파악하기 어렵기 때문이다. 가상의 4개 유역은 모두 동일한 유역면적을 가지며 극단적인 경우를 고려하기 위해 주관로가 중앙에 위치하며 유역의 세로 길이가 가로길이의 2배 및 1/2배인 경우와 주관로가 유역의 한쪽에 치우쳐 있으면서 세로 길이가 가로길이의 2배 및 1/2배인 경우를 각각 가정하였다. 유역면적은 A\_유역, B\_유역, C\_유역, D\_유역은 공히 72ha로 동일하며, 유역폭은 유역의 형상으로 인해 Eq. (4)와 Eq. (5)로부터 각각 2,400m, 1,200m, 1,200m, 600m로 다른 값을 가지게 된다. 가상유역에 대한 유역 및 수문특성인자의 경우, 지면경사(m/m) 0.05, 불투수 조도계수 0.012, 투수 조도계수 0.04, 불투수 표면저류 0.3, 투수 표면저류 0.8, 불투수율(%) 50으로 동일하게 가정하여 적용하였다. 가상유역의 유출모의시 경우는 1mm/hr 경우 하나만을 분포시켰으며, 강우는 침투하지 않고 모두 유출된다고 가정하였다.

Fig. 4에서 A\_유역의 경우, 관이 유역 중심을 지나고 유역이 세로로 길기 때문에 지표흐름이 나머지 유역과 비교하여 가장 짧다. 따라서 침투유량은 증가한다. Fig. 4의 D\_유역의 경우 관이 유역의 끝부분을 지나고 유역이 가로로 길기 때문에 지표흐름이 가장 길다. 따라서 도달시간은 증가하게 되어 침투유량은 감소한다. 그리고 유역 및 관의 형상이 상이한 Fig. 2(b) 및 (c)의 경우, 전체적인 지표흐름은 동일하지만 B\_유역의 관 길이가 짧기 때문에 C\_유역보다 침투유량이 크고, 유출이 빨리 끝날 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 4에서 B\_유역과 C\_유역의 유출수문곡선이 동일하게 계산된다. 이는 기존유역폭이 관의 측방으로 유입된 강우가 유출구에서 바로 유출된다고 가정하기 때문에, 즉 소배수구역의 관의 흐름을 고려치 않기 때문에 발생하는 현상이라 생각된다. 따라서 소배수구역내 관의 흐름을 고려하지 못하여 발생하는 이러한 문제점은 소배수구역의 크기가 크고, 관의 길이가 길수록 더욱 증가될 것이다.

한편, EXTRAN 블록이나 RUNOFF 블록에서의 관망 흐름해석은 이와 같은 소배수구역내의 하도흐름을 고려할 수 없다. 왜냐하면 이들 블록에서의 관망해석은

소배수구역 유출구에서 유출되어 Node에 유입된 시점부터의 관망을 해석하기 때문이다. 이들 블록에서 소배수구역의 안에 있는 작은 관망까지 고려하기 위해서는 소배수구역을 더 작은 소배수구역으로 분할하여 소배수구역내 작은 관망까지 고려하여야 하나 SWMM을 유역에 적용하는데 있어 유역의 모든 관망을 고려하여 유역을 분할하기란 불가능할 뿐만 아니라 Fig. 1에서 소배수구역은 소배수구역내 하도가 존재하는 것으로 가정함으로 소배수구역을 아무리 작게 나누어도 소배수구역내 하도를 고려하지 못하는 문제는 여전히 내포하고 있다. 이것이 정종호와 윤용남(2007)이 지적한 SWMM 모형의 경우 유역분할방법에 따라 모형 매개변수 및 산정유출량이 달라지는 주요 원인이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 소배수구역내 하도 관망이 고려된 수정 유역폭식을 제안하여 기존 SWMM에서 소배수구역내 하도를 고려하지 못하는 문제점을 해결하고자 한다.

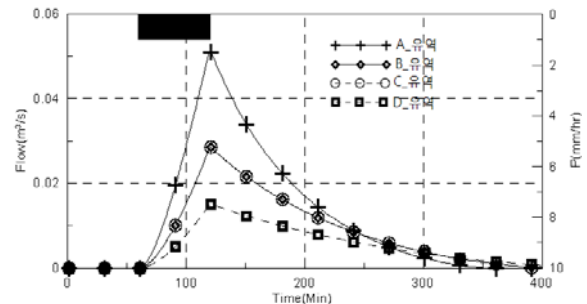


Fig. 4. Outflow Characteristics on the Assumed Watersheds

### 4. 수정유역폭식의 개발

본 연구에서는 SWMM의 기존 유역폭 산정식이 소배수구역내 하도흐름을 고려하지 못하여 발생하는 문제를 해결하기 위해서 소배수구역내 하도흐름을 고려한 수정유역폭식을 개발하였다. Fig. 5는 소배수구역내 관의 흐름을 고려하기 위한 개념도로서 단위폭당 지표면 흐름에 관 흐름을 더한 흐름을 고려한 것이다. 즉, 지표면에 존재하는 무수히 많은 단위폭당 흐름선은 각각의 지표면 흐름선을 가지며 이는 위치마다 다르다(Fig. 5(a)). 이때 관의 흐름 도달시간은 Fig. 5(b)와 같이 최상류에서 관의 흐름속도( $V_p$ )로 관의 총길이( $L$ )를 나눈 값이 되며, 최하단에서는 0이다. 그러나 본 연구에서는 실제 관로의 흐름시간을 Fig. 5(c)와 같이 위치에 따라 일정한 값을 가지는 평균화된 흐름으로 가정하였다. 즉, 관의 흐름을 고려한 도달시간은 지표의 도달시간과 관길이( $L$ )의 1/2를 흐름속도( $V_p$ )를 나누어준 값의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 기존 SWMM의 유역내 지

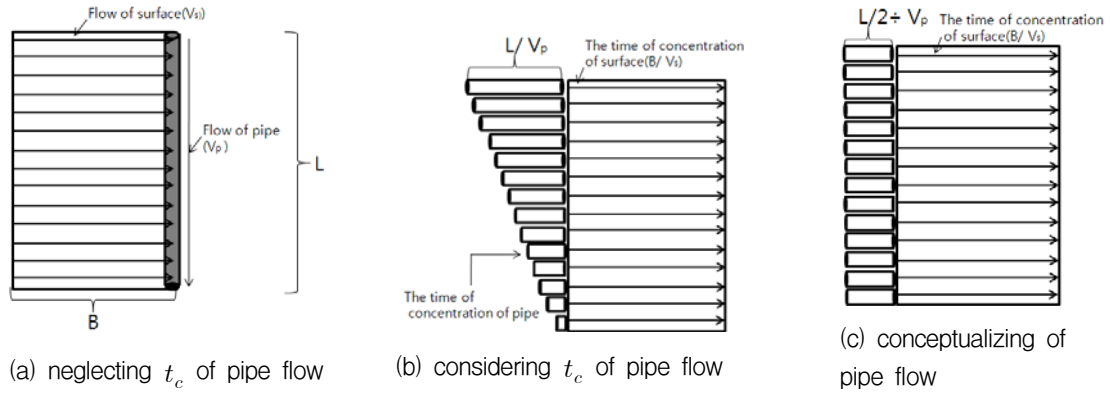


Fig. 5. Travel Time( $t_c$ ) of Surface Runoff and Pipe Flow

표흐름속도를  $V_s$ 라고 한다면, 관이 고려된 소배수구역 내 지표면흐름 속도는  $V_s$ 와  $V_p$ 의 평균으로 정의할 수 있다.

관의 흐름이 고려된  $V_s$ 와  $V_p$ 를 Fig. 5(c)에서  $V_{(s+p)}$ 와 같이 정의하면, 관의 흐름이 고려된 지표흐름속도  $V_{(s+p)}$ 은 Eq. (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{(s+p)} = \frac{B}{\frac{B}{V_s} + \frac{L}{2 \cdot V_p}} \quad (8)$$

여기서,  $V_s$ 는 지표흐름속도,  $V_p$ 는 관의 흐름 속도,  $B$ 는 지표흐름 길이,  $L$ 은 관의 길이이다. Fig. 5(c)와 같이 관의 흐름을 지표흐름에 더해져 산정한다고 가정할 때 지표흐름의 거리  $B$ 는 변하지 않고, 걸리는 시간은  $L/(2 \cdot V_p)$ 만큼 증가한다. 또한, 관의 흐름을 이와 같이 가정하면 관의 동수반경 및 경사는 지표면의 그것과 동일하기 때문에 관의 속도( $V_p$ )는 Eq. (9)와 같이 산정할 수 있다. 이때 관의 흐름은 지표흐름 속도와 조도계수만의 함수로 표현된다.

$$V_p = \frac{n_s}{n_p} V_s \quad (9)$$

여기서,  $n_s$ 는 지표면 조도계수,  $n_p$ 는 관의 조도계수이다. Eq. (9)를 Eq. (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_{(s+p)} = \frac{2B}{2B + L \cdot \frac{n_p}{n_s}} \cdot V_s \quad (10)$$

Eq. (10)에서 지표흐름의 거리  $B$ 는 관의 위치에 따라 길이가 변함으로 이에 대한 보정이 필요하다. 이를

왜곡도계수(Digiano et al., 1977)를 이용하여 관의 위치에 따른  $B$ 의 변화를 보정하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_{(s+p)} = \frac{2 \cdot B}{2 \cdot B + L \cdot \frac{n_p}{n_s} (2 - S_k)} \cdot V_s \quad (11)$$

실제유역형상은 Fig. 5(c)와 같이 직사각형 형태가 아니므로  $B$ 를 지형학적인 유역평균폭  $A/L$ 로 정의하면, Eq. (11)은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{(s+p)} = \frac{2 \cdot A}{2 \cdot A + L^2 \cdot \frac{n_p}{n_s} (2 - S_k)} \cdot V_s \quad (12)$$

Eq. (12)를 간략하게 정리하면 다음과 같다.

$$V_{(s+p)} = a \cdot V_s \quad (13)$$

여기서,  $a$ 는  $\frac{2 \cdot A}{2 \cdot A + L^2 \cdot \frac{n_p}{n_s} (2 - S_k)}$ 로 나타낼 수 있

으며 이는 지표면 흐름에 관의 흐름이 고려된 가중치로 0부터 1사이의 값을 가진다. 관의 흐름을 고려하지 않았을 경우의 유량은 Eq. (14)와 같고, 관의 흐름을 고려하였을 경우의 유량은 Eq. (15)와 같다.

$$Q_{(s)} = A \cdot V_s = w_s \cdot (d - d_p) \cdot V_s \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Q_{(s+p)} &= w_s \cdot (d - d_p) \cdot V_{(s+p)} \\ &= w_s \cdot (d - d_p) \cdot a \cdot V_s \end{aligned} \quad (15)$$

즉, 관의 흐름을 고려하였을 경우 유량( $Q_{(s+p)}$ )는 관의 흐름을 고려하지 않았을 경우의 유량( $Q_{(s)}$ )보다 계수

$a$ 만큼 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러므로 관의 흐름을 고려한 유량을 SWMM에서 산정하기 위해서는 계수  $a$ 를 고려해야 하며, 이는 Eq. (14)에서 SWMM에서 지표면 흐름속도와 유출량을 조절하는 유역폭에 가중치  $a$ 를 곱하여 고려할 수 있다. 그러므로 관의 흐름이 고려된 수정유역폭식  $w_{(s+p)}$ 의 식을 Eq. (16)과 같이 도출할 수 있다.

$$Q_{(s+p)} = (w_s \cdot a) \cdot (d - d_p) \cdot V_s$$

$$w_{(s+p)} = w_s \cdot a = a \cdot (2 - S_k) \cdot L \quad (16)$$

여기서,  $a$ 는 관을 고려한 계수로서  $\frac{2 \cdot A}{2 \cdot A + L^2 \cdot \frac{n_p}{n_s}(2 - S_k)}$ 이며,  $0 < a < 1$ 의 범위이다.

## 5. 수정유역폭식 적용 및 분석

### 5.1 가상유역

수정유역폭식을 실제유역에 적용하기에 앞서 Fig. 2의 가상유역에 적용하여 기존 유역폭식의 문제점을 해결할 수 있는지를 분석하였다. 유역폭을 제외한 모든 유역 및 수문특성인자는 전술한 바와 동일하게 설정하였다. 수정유역폭식에 의해 산정된 유역폭의 경우 A\_유역은 1286.4m, B\_유역은 986m, C\_유역은 837.6m, D\_유역은 540m로 산정되어 수정유역폭은 기존 유역폭보다 작게 산정된 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 수정유역폭식과 기존 유역폭식을 각 가상유역별로 비교한 것이다. Fig. 2(a)의 A\_유역의 경우 지표흐름에 비해 관이 길어 관의 흐름에 의한 지체효과가 유출산정에 미치는 영향이 크기 때문에 첨두유량감소가 가장 컸으며, Fig. 2(d)의 D\_유역의 경우 지표흐름에 비해 관이 짧아 관의 지체효과가 유출산정에 미치는 영향이 미비하여 첨두유량감소가 크지 않았다.

또한 기존 유역폭식과 수정유역폭식을 유역이 같은 형태이고 관의 위치가 다른 경우에 적용한 결과를 Fig. 7과 같이 나타냄으로서 관 위치에 따른 유출변화 특징을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 유역 형태 일지라도 관의 위치 따라 관의 지체효과를 반영하는 정도가 다름을 알 수 있다.

유역 및 관의 형태가 다름에도 불구하고 기존식을 이용할 경우 유역폭이 같이 나오는 Fig. 2의 B\_유역과 C\_유역을 Fig. 8과 같이 비교함으로써 수정유역폭식의 개선점을 확인할 수 있다. 그림에서와 같이 수정유역폭식은 관의 흐름을 고려하여 Fig. 2의 B\_유역과 C\_유역의 유출특성을 다르게 모의하였다. 이는 Fig. 2의 C\_유역이 B\_유역보다 관이 길어 그만큼 유역에서 지체되는 효과가 크므로 Fig. 2(c)의 C\_유역의 첨두유량이 Fig. 2(b)의 B\_유역보다 작아지기 때문이다.

따라서 수정유역폭식을 가상유역에 적용한 결과로부터 기존 유역폭식이 관의 흐름을 고려하지 못함으로 인해 발생하는 문제를 개선할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 이는 관측값이 없는 가상의 유역에 적용한 결과로서 수정유역폭식이 유출특성을 반영하고 있음을 정성적으로 확인한 것이며, 정량적인 분석은 아니다.

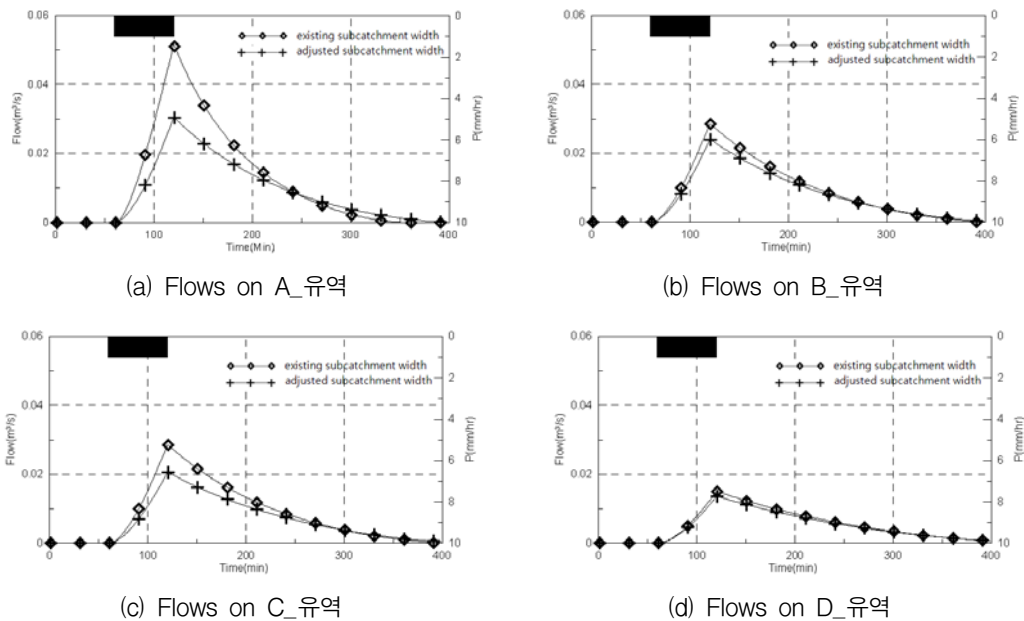


Fig. 6. Simulated Flows on Different Watersheds and Different Subcatchment Width Equations

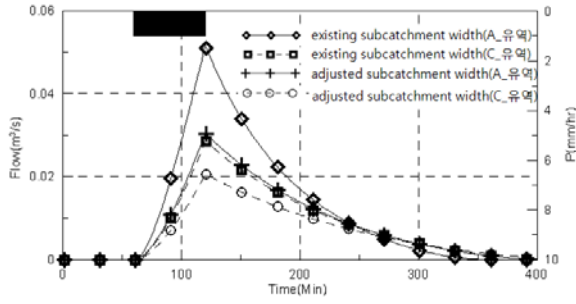


Fig. 7. Flow Characteristics Depending on Pipe Location

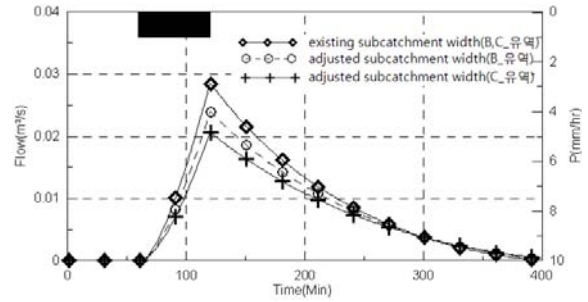


Fig. 8. Flow Characteristics Depending on Watershed Shape and Pipe Location

## 5.2 실제유역

실제유역에 대한 수정유역폭식의 거동특성을 분석하기 위해 군자배수구역을 시범지역으로 선정하고, 강우사상에 대한 유출의 반응특성을 실측하였다(Fig. 9). 군자배수구역은 면적이 약 96.3ha이고, 주택지와 상업지, 아파트 단지가 약 50%, 도로 및 공공시설물이 25%정도인 전형적인 도시유역이다. 또한, 20%정도는 산지로 구성되어 있으며, 약 75%정도의 도시화가 진행되었다. 군자배수구역의 유출구는 성동구 군자교 하류에 위치해

있으며 우수는 중랑천으로 방류되거나 중랑하수처리장으로 유입된다. Fig. 9(b)는 SWMM을 구축하기 위해 군자배수구역을 33개 유역으로 분할한 것이다. 여기서 유역 분할은 정확도 높은 유량을 산정하기 위하여 주하도를 최대한 고려하여 소매수구역을 분할하였다. 소매수구역은 하나의 동일한 유역특성을 가진 등가 소유역을 의미하며, 관로 및 지형학적 조건을 고려하여 분할한다. 이때 소매수구역은 관망을 중심으로 하나의 유역으로 구성하게 된다.

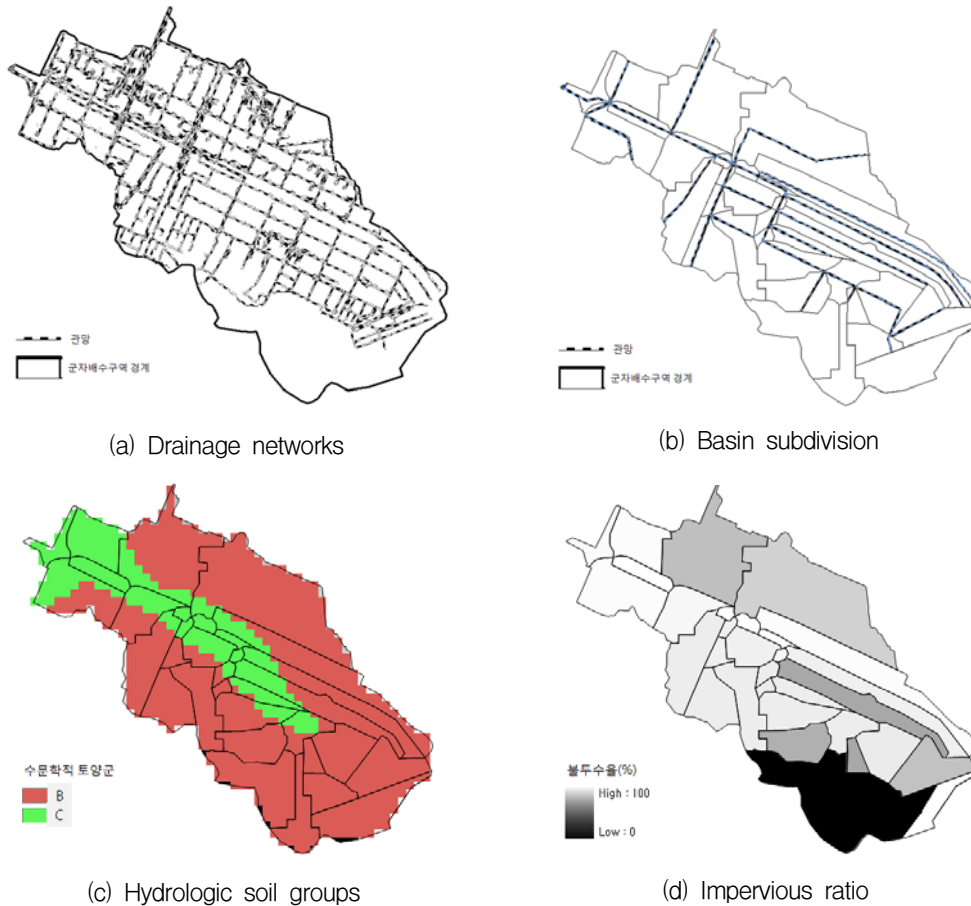


Fig. 9. Gunja Experimental Site



유역폭식의 적합성을 실제유역에서 검증함에 있어서 유역폭 이외의 다른 매개변수의 값을 추정하는 것은 매우 중요하다. 이는 유출산정에 있어서 유역폭 이외의 다른 매개변수들이 복합적으로 유출산정에 작용하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 모든 매개변수를 추정함에 있어서 매개변수를 특별히 보정하지 않고, 최대한 객관적으로 산정(nominal value)하여 유역폭식을 검증함에 있어서 객관성을 최대한 유지하도록 하였다. SWMM에서의 입력자료는 소유역 면적, 우량, 침투량, 조도계수, 불투수율, 저류손실 수심, 유역경사 그리고 유역폭등이다. 여기서 소유역 면적, 우량 그리고 유역경사 등의 자료는 강우자료 및 지형자료를 활용하여 비교적 객관적인 추정이 가능하며, 유역폭을 제외한 침투량, 조도계수, 저류손실 그리고 불투수율 입력자료는 다음과 같이 추정하였다.

침투량은 Horton 방정식을 이용하여 산정하였다. Horton 방정식을 사용할 경우, 유역의 중기침투능과 초기침투능 산정이 필요하며, 이는 수문학적 토양군을 근거로 Table 1과 같이 추정하였다(이종태 등, 1996). 일반적으로 침투량은 강우를 제외하고, 모형의 입력자료 중 유출총량과 침투유량에 영향을 가장 많이 미치는 입력자료이다. Fig. 9(c)는 군자배수구역에서 정밀토양도를 이용하여 100×100m 격자별 수문학적 토양군을 산정한 결과이다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 보정을 전혀 거치지 않고 유역별로 침투량 계수를 산정하여 침투

량 산정의 객관성을 유지하였다. 한편, 일반적인 강우-유출 모형과 다르게 도시유출 모형인 SWMM의 유출산정에 영향을 많이 미치는 입력자료 중의 하나가 불투수율이다. 이는 토지의 포장면적 정도를 나타내는 입력자료로서 포장된 유역에서는 우량은 침투되지 않고, 모두 유출되는 것으로 모형에서 모의하기 때문에 불투수율 산정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 9(d)와 같이 군자배수구역의 도시생태현황도로부터 불투도포비 현황을 30×30m raster 자료로 전환한 후, 각 소배수구역별로 평균하여 불투수율을 산정하였다. Table 2(이종태 등, 1996)는 지표면 조도계수 범위를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 군자배수구역 전체에 대해서 하나의 조도계수만을 적용하여 주관적 판단에 의해 소배수구역에 따라 조도계수가 다르게 산정하는 불확실성을 최소화 하였다. 투수지역 조도계수는 20% 정도가 산지임으로 공원에서 가장 큰 조도계수 값인 0.08을 사용하였으며, 불투수지역 조도계수는 49% 정도가 주거지가 진행된 유역임으로 저밀도 주거지역의 값 0.055를 사용하였다. Table 3(이종태 등, 1996)은 표면굴곡으로 인한 저류깊이를 나타낸 것으로 초기 손실 부분을 결정하는 요소이다. 조도계수와 같이 유역 전체에 대해서 하나의 저류깊이를 산정하였다. 불투수유역은 포장된 유역 값인 0.13을 사용하였으며, 투수유역은 0.8을 유역 전체에 적용하였다.

Table 1. Infiltration Rate of Horton

|                                    | Hydrologic Soil Group |      |     |     |
|------------------------------------|-----------------------|------|-----|-----|
|                                    | A                     | B    | C   | D   |
| Initial Infiltration Rate (mm/hr)  | 25.4                  | 12.7 | 6.4 | 2.5 |
| Ultimate Infiltration Rate (mm/hr) | 254                   | 203  | 127 | 76  |
| Ponding Time                       | 2                     | 2    | 2   | 2   |

Table 2. Roughness Coefficient of Surface

| Land Use                 | Industrial  | Commercial  | High Density Residential | Low Density Residential | Park        |
|--------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------------------|-------------|
| Coefficient of Roughness | 0.015-0.030 | 0.020-0.035 | 0.025-0.040              | 0.030-0.055             | 0.040-0.080 |

Table 3. Depth of Storage

| Cover Condition |        | depth (mm)    |             |
|-----------------|--------|---------------|-------------|
| Impervious      | Pave   | 0.13 - 0.40   |             |
|                 | Roof   | Horizontality | 0.25 - 0.80 |
|                 |        | Inclination   | 0.13 - 0.25 |
| Pervious        | Lawn   | 0.50 - 1.25   |             |
|                 | Forest | 0.50 - 1.50   |             |

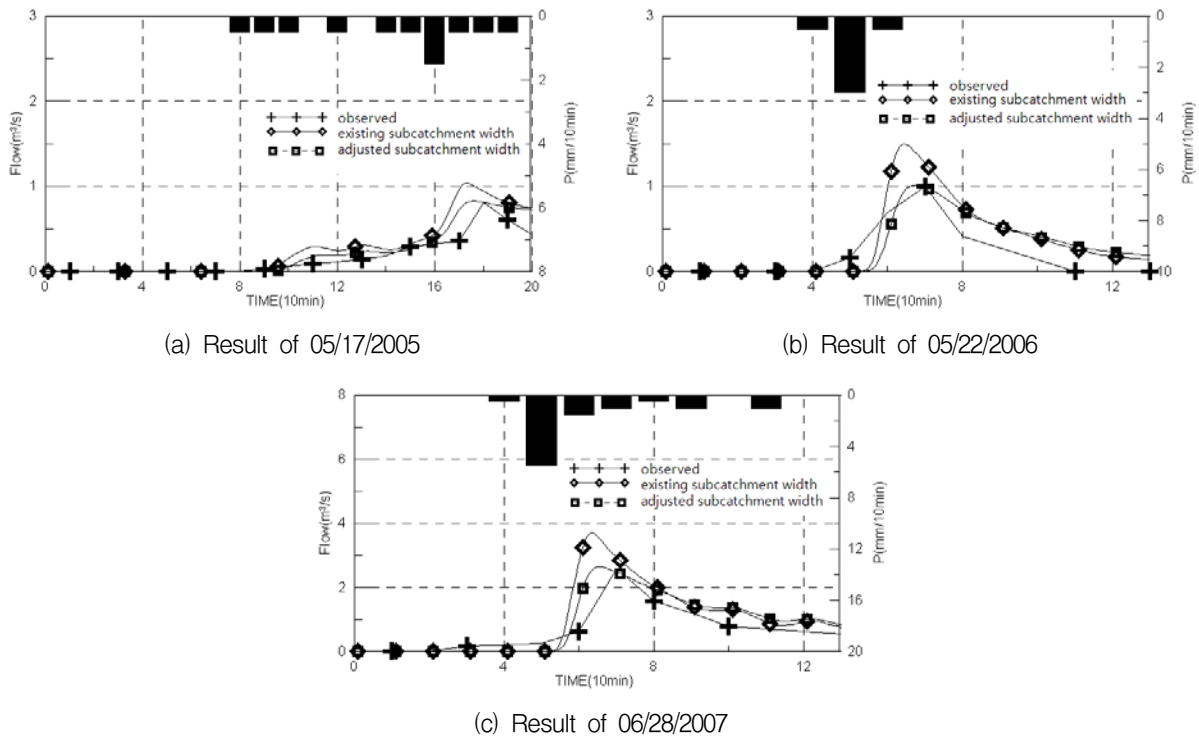


Fig. 10. Observed and Simulated Flows on Different Width Equations

Table 4. Comparison of a Statistics

|                             | 2005/05/17                      |                            | 2006/05/22                      |                            | 2007/06/28                      |                            |
|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
|                             | Relative Error of Peak flow (%) | Coefficient of Correlation | Relative Error of Peak flow (%) | Coefficient of Correlation | Relative Error of Peak flow (%) | Coefficient of Correlation |
| Existing Subcatchment Width | 27.9                            | 0.814                      | 49.9                            | 0.770                      | 43.6                            | 0.823                      |
| Adjusted Subcatchment Width | 2.1                             | 0.878                      | 0.9                             | 0.884                      | 2.1                             | 0.920                      |

Fig. 10은 군자배수구역에 대해 기존 유역폭과 수정 유역폭을 적용한 결과를 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 모든 강우사상에 대해서 수정유역폭의 유출수문곡선이 기존 유역폭의 유출수문곡선 보다 관측값에 가깝게 모의하고 있는 것을 볼 수 있다. Table 4는 관측값에 대한 각각의 통계치를 나타낸 것이다. 표에 제시된 바와 같이 기존 유역폭의 침투유량이 27.9% 이상 관측값보다 높게 유출 모의를 하는 것을 볼 수 있는데, 이는 기존 유역폭식의 경우 소배수구역내 관의 흐름을 고려하지 못하기 때문이다. 소배수구역내 관의 흐름을 무시하는 기존 유역폭식의 경우, 관의 흐름 때문에 지체되는 효과를 고려하지 못하여 침투유량이 과다 산정되어지는 것으로 판단된다. 소배수구역의 관의 흐름을 고려하지 못하여 침투유량이 높게 산정되어지는 문제는 소

배수구역 하나로 보면 그 양이 크지 않을 수도 있으나 Fig. 9(b)와 같이 작은 소배수구역이 하나의 유역을 이루기 위해 엮어지면 오차가 누적되어 Table 4와 같이 많은 오차를 보이게 된다. 하지만 수정유역폭식의 경우, 소배수구역내 하도가 유역폭으로 고려됨으로 소배수구역내 하도를 고려하지 못하여 유출의 부정확성이 발생하는 문제를 줄일 수 있다. Table 4에서 수정유역폭의 침투유량과 관측 침투유량 차이는 2.1% 이하로 산정되었으며 상관계수는 수정유역폭식이 기존 유역폭식보다 모든 강우사상에 대해서 높은 상관계수 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 수정유역폭식이 기존 유역폭식보다 소배수구역의 흐름 특성을 잘 반영하고 있기 때문이다.

## 6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 도시유출해석을 위해 많이 사용되고 있는 SWMM의 기존 유역폭식의 문제점을 제시하고, 자연상태의 실제흐름에 보다 근접하게 흐름을 모의할 수 있는 수정유역폭식을 제안하였다. 이를 위해 기존 유역폭식이 유역형상을 잘 모의하고 있는지 분석하기 위해 모형이론을 검토하고, 가상유역에 모형을 적용하여 타당성을 분석하였다. 그 결과 기존 유역폭식의 경우, 소유역내 관의 흐름을 고려하지 않기 때문에 일부 유역의 경우 유역형상을 제대로 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 소유역에서의 지표면 흐름뿐 아니라 관로의 흐름을 고려할 수 있는 수정유역폭식을 개발하였으며, 개발된 식의 검증을 위해 가상유역과 실제 유역에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 가상유역에 적용한 결과, 수정유역폭식은 유역형상을 제대로 반영하는 강우-유출 수문응답을 나타내는 것으로 분석되었으며, 실제유역에 기존유역폭과 수정유역폭을 적용한 결과 수정유역폭식이 기존 유역폭식 보다 흐름을 더 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 수정유역폭식은 기존 유역폭식이 유역형상을 제대로 반영하지 못하는 문제를 해결한 것으로 판단되며, 유출 산정의 정확성 역시 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 소비수구역분할 방법이 하나의 경우에 대해서만 수정유역폭식의 적합성을 검증하였다. 하지만 기존 유역폭식의 경우, 소비수구역 분할 방법에 따라 소비수구역내 하도를 고려하지 못하는 정도가 다르므로 소비수구역 분할 방법에 따른 수정유역폭식의 적합성에 대한 연구가 추가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다.

## 참 고 문 헌

- 이준우, 김성준 (2001). “간척담수호 유역의 비점오염 추정을 위한 SWMM의 적용 -홍보간척지구-.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집(III)**, 한국수자원학회, pp. 826-832.
- 이종태 (1998). “도시유역에서의 유출 및 수질해석 모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 709-725.
- 이종태, 강태호, 김정환 (1996). **도시유역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM 모형**, 제4회 수공학위탁사업, 한국수자원학회, pp. 97-204.
- 정종호, 윤용남 (2007). **수자원설계실무**, 제2판, 구미서관, pp. 53-57.
- Digiano, F.A., Adrain, D.D. and mangarella, P.A (1977). *Short Course proceedings-Applications of Stormwater management models*. EPA-600/2-77-065, Environmental Protection Agency, Cincinnati
- Horton, R. E (1940). "An approach forward physical interpretation of infiltration capacity." *Soil Science Society of America Preceeding* 5, pp. 399-417.

(논문번호:08-122/접수:2008.12.22/심사완료:2009.01.16)