

유역특성 변화에 따른 도시유출모형의 매개변수 민감도분석(I)

-민감도분석방법의 개발-

The Sensitivity Analysis of Parameters of Urban Runoff Models due to Variations of Basin Characteristics (I)

-Development of Sensitivity Analysis Method-

서 규 우* / 조 원 철**

Seo, Kyu Woo / Cho, Won Cheol

Abstract

In this study, the new dimensionless values were defined and proposed to determine the parameters of urban runoff models based on the relative sensitivity analysis. Also, the sensitivity characteristics of each parameter were investigated. In order to analyze the parameter sensitivities of each model, total runoff ratio, peak runoff ratio, runoff sensitivity ratio, sensitivity ratio of total runoff, and sensitivity ratio of peak runoff were defined.

$$\text{Total runoff ratio}(Q_{TR}) = \frac{\text{Total runoff of corresponding step}}{\text{Maximum total runoff}}$$

$$\text{Peak runoff ratio}(Q_{PR}) = \frac{\text{Peak runoff of corresponding step}}{\text{Maximum peak runoff}}$$

$$\text{Runoff sensitivity ratio}(Q_{SR}) = \frac{Q_{TR}}{Q_{PR}}$$

And for estimation of sensitivity ratios based on the scale of basin area, rainfall distributions and rainfall durations in ILLUDAS & SWMM, the reasonable ranges of parameters were proposed.

Keywords : runoff analysis, ILLUDAS, SWMM, parameter, sensitivity analysis

요 지

본 연구에서는 새로운 무차원값을 제시하여 도시유출모형의 매개변수결정을 위한 상대적인 민감도분석을 실시하여 매개변수별 민감도특성을 구명하였다. 민감도분석을 위한 무차원값으로 총유출량비, 첨두유출량비, 유출민감도비, 민감도비율을 다음과 같이 개발하였다.

$$\text{총유출량비}(Q_{TR}) = \frac{\text{해당단계의 총유출량}}{\text{최대 총유출량}}$$

$$\text{첨두유출량비}(Q_{PR}) = \frac{\text{해당단계의 첨두유출량}}{\text{최대 첨두유출량}}$$

$$\text{유출민감도비}(Q_{SR}) = \frac{\text{총유출량비}}{\text{첨두유출량비}}$$

유역면적의 크기와 강우분포형과 강우지속기간별로 각 적용단계별 총유출량비, 첨두유출량비, 유출민감도비를 산정하기 위해 ILLUDAS모형과 SWMM모형의 매개변수를 선정하고 적정 적용범위를 결정하였다.

핵심용어 : 유출해석, ILLUDAS모형, SWMM모형, 매개변수, 민감도분석

* 동의대학교 토목공학과 전임강사

** 연세대학교 토목공학과 교수, 국립방재연구소 소장

1. 서 론

현대사회의 지속적인 도시화 및 산업화로 도시화되기 이전에 지표면이 갖고 있었던 보수 및 유수기능 등이 현격하게 줄어들었고 도시유역내 하수관거를 통해 하천으로 유입되는 흥수유출량이 이전보다 증대되고 유역출구점까지의 도달시간은 오히려 단축됨으로써 첨두유량이 증가하는 수문학적 변화양상을 띠고 있다(Kibler, 1982). 더욱이 우리나라로 '60, '70년대이후 인구의 급격한 도시집중에 따라 택지 및 시설부지의 절대부족으로 하천범람 구역이나 흥수우려가 있는 범람원내의 저지대에까지 주택, 건물 기타 도로시설 등이 건설됨으로써 치수면에서의 안전도가 상대적으로 저하되고 있는 실정이다(서규우 등, 1996a; 대한주택공사, 1995). 이와 같이 도시유역에서의 대규모적인 단지개발이나 도시화에 따른 우수유출의 정확한 해석은 도시하천 구조물의 적정한 계획 및 설계를 위해서 매우 중요하다. 그러므로 이를 해석하기 위한 도시유출모형의 선정 및 적용과정이 신중하고 정확하게 이루어져야 함에도 관련 수문자료의 미비로 인해 정확하게 모형의 검정과 검증이 이루어지지 않거나 명확하게 모형이 확립되지 못한 상태에서 적용이 되고 있는 실정이다(서규우 등, 1996b; 한국토지개발공사, 1989; 한국토지공사, 1997).

이에 본 연구에서는 도시화지역의 수문현상의 변화를 해석하기 위해 한강수계의 동수천유역(460 ha)과 금강수계 무심천유역의 청주용암 택지개발지구내 시험유역(99.7 ha)을 대상으로 하여 대표적인 도시유출모형인 ILLUDAS모형과 SWMM모형의 주요 매개변수를 선정하고 선정된 매개변수의 민감도분석을 실시하여 이를 결과를 분석하고자 한다.

2. 적용모형의 기본이론

2.1 ILLUDAS 모형

도시유출모형의 초기 모형인 RRL 방법은 단지 배수로에 직접연결된 유역의 포장된 지역으로부터의 유출량을 고려한 것으로서, 녹지지역은 배수로시스템에 직접연결되지 않은 포장된 지역과 더불어 유출해석의 대상에서 제외하였으므로, 이에 대한 보완이 필요하였다. 이에 ILLUDAS(Illinois Urban Drainage Area Simulator) 모형(Terstriep과 Stall, 1974)은 이러한 문제점을 극복하기 위하여 기본적으로는 RRL 방법과 그 기본해석 개념을 같이 하면서도 녹지지역과 배수로와 직접 연결

되지 않은 포장지역에서의 유출도 고려한 점이 RRL 방법과 다르다. ILLUDAS 모형을 적용함에 있어서 먼저 검토유역을 여러 개의 소배수구역으로 나눈다. 한 배수구역내에서의 유출은 대체로 한 유입구를 통하여 배수로로 연결되는 과정이 같다고 보았으며, 각 배수구역내에서는 직접연결 포장면적과 포장면적의 좌원점에서 설계유입지점까지의 도달시간, 녹지지역면적 및 간접연결 포장면적, 침투능 등의 특성들이 주로 고려된다. 직접연결 포장지역이 결정되면, 포장지역을 거쳐 배수구역의 하류단으로 유입하는데 소요되는 도달시간을 산정한다. 표면류의 유속과 도달시간은 Hicks(1944)의 식에 근거를 두고 있는 바, 본 모형에서 포장지역에서의 도달시간은 먼저 포장지역 가로배수구에서는 약 0.035~0.070 cms/ha의 흐름이 있는 것으로 가정하고, Manning의 식을 적용하여 가로배수구에서의 유속을 계산함으로 구해진다. 각 도달시간에 대한 누가면적의 관계곡선으로서 임의의 시작에서 유입량에 기여하는 포장면적의 크기를 나타낸다. 다음 그림 1은 ILLUDAS 모형의 계산흐름도이다(Terstriep과 Stall, 1974).

비포장지역의 강우는 지표면에서 저류되거나 토양 속으로 침투된다. 표면저류의 강우깊이는 대체로 5.08 mm 정도로 보며 ILLUDAS 모형에서는 임의의 값을 선택적으로 사용할 수도 있게 하였다. 녹지지역에서 강우의 상당한 부분은 침투가 되며 그 침투양상은 복잡하다. 침투로 인한 초기강우깊이를 예측하기 위하여서는 Holtan(1961)의 개념이 활용된다. 침투율에 대한 이론적인 연구는 대수층에서의 보수력과 대수층으로의 유출입에 따른 저류능력 등을 추산하기 위한 흙의 물리적 성질을 기본적인 근거로 하고 있다.

한편 토양형의 선택은 미토양보존국(U.S. SCS)이 흙의 수문학적 특성을 고려하여 4종류로 구분한 토양형을 사용하였다(Terstriep과 Stall, 1974). 표준침투율곡선은 흙을 SCS의 A, B, C, D로 구분하고 시간의 변화에 따른 각각의 침투율을 산정하기 위한 것으로서, Chow(1964)에 의해 제안된 Horton(1933)의 식에 근거한 것이다(Terstriep과 Stall, 1974).

포장지역과 비포장지역에서의 수문곡선이 합쳐져서 각 배수분구에 대하여 유도된 하나의 유입수문곡선으로부터 각 배수로 설계지점에서의 유입량이 공급된다. 유입한 물이 배수로의 한 지점에서 다음 지점으로 전달되는 과정의 해석방법으로는 저류추적(storage routing) 법이 사용된다. 본 방법을 적용함에 있어서는 두 유입지점에서의 유량과 두 지점의 배수로구간에서의 저류량과

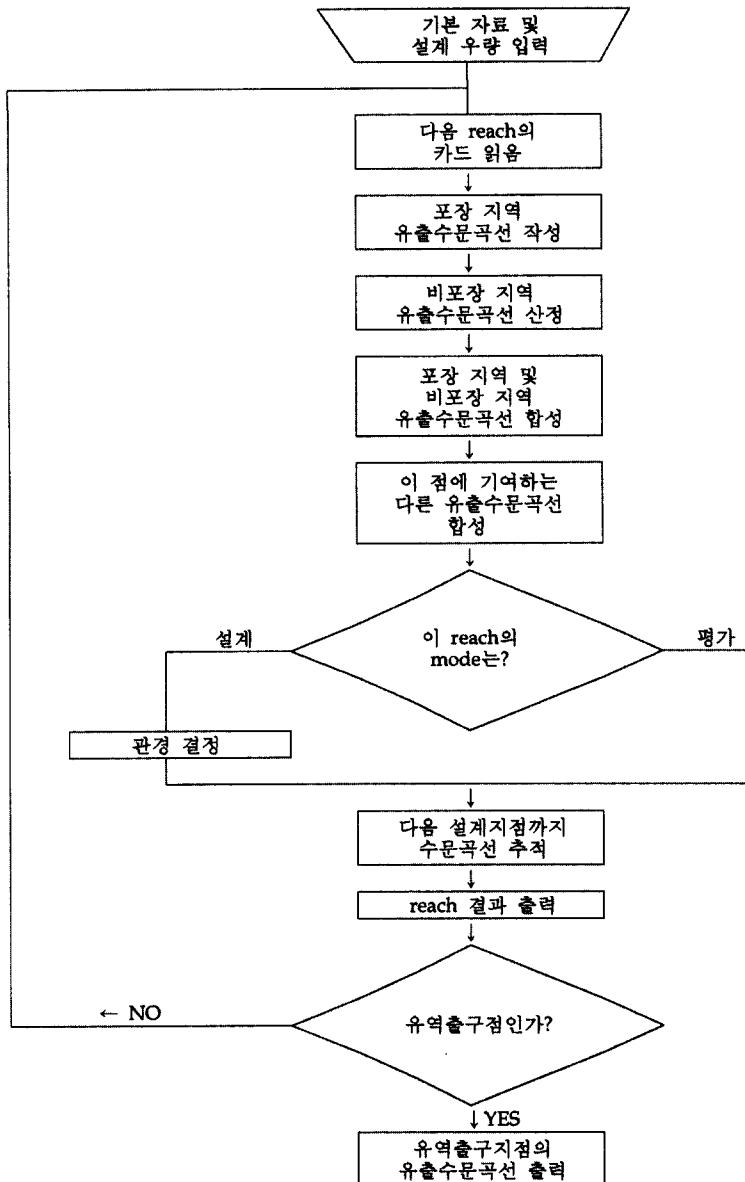


그림 1. ILLUDAS 모형의 계산 흐름도

의 관계성이 필요하게 되며, 이를 위하여 먼저 검토대상 수로단면에서의 수위-유량관계를 Manning의 식에 의하여 구하는 바, 배수로 구간의 길이와 형상이 결정되면 흐름은 등류상태로 가정하여 유량-수위관계가 구해진다. 이때 발생되는 오차를 최소화하기 위하여 계산시간간격과 구간거리를 가능한 작게 잡는 것이 좋다. ILLUDAS 모형에서는 수로의 단면형을 원관, 샤다리꼴, 직사각형 단면 등 세 종류로 구분하였다.

2.2 SWMM 모형

SWMM(Storm Water Management Model) 모형은 1971년 미국 EPA와 Metcalf & Eddy 회사가 Florida 대학 및 W.R.E.와의 공동 연구로 도시유역 하수시스템내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발된 모형이다. 1981년에는 SWMM 모형내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조

물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 SWMM 모형에 포함시켜 보완하였다(Huber와 Dickinson, 1988; Singh, 1995). SWMM 모형은 도시유역내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하흐름, 배수관망에서의 유출량추적, 저류량산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다(Huber와 Dickinson, 1988). SWMM 모형의 기본적 성격은 다음과 같이 정리될 수 있다. 적용 가능한 대상유역은 도시유역, 인위적 배수계통을 갖는 소유역 등이다. 시간적 특성은 단일, 연속강우에 의한 계산이 가능하며, 강우간격은 임의로 설정할 수 있다. 연산시간간격은 강우사상에 대해 임의조절이 가능하다. 공간적 특성은 소배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하다(Huber와 Dickinson, 1988). 물리적 특성으로 유출은 강우와 융설로 발생하고 지표면유출은 비선형저류방정식을 사용한다. SWMM 모형에서 침투량산정에는 Horton(1933) 또는 Green-Ampt 식을 사용한다. 수로와 관로에 대해 RUNOFF 블록은 비선형저류방정식, TRANSPORT 블록은 kinematic 방정식, EXTRAN 블록은 Dynamic 방정식과 연속방정식을, 저류추적방법은 수표면이 평행하다고 가정한 수정Pulse방법을 사용한다(Huber와 Dickinson, 1988).

SWMM 모형의 구성은 5개의 실행블록들과 5개의 보조블록들로 구성되며, 126개의 부프로그램들을 포함하고 있다. 모형의 초기연산이 수행되는 부분으로 강우사상에 대해 배수 유역에서의 유출현상과 수질변화를 모의한다. RUNOFF 블록은 임의의 강우주상도, 선행강우조건, 토지이용도, 지형도 등의 자료를 이용하여 지표면, 지표하유출을 추적한다. 배수시스템에서 유량과 오염물질을 추적하고, 주관거에서의 수문곡선과 오염도곡선을 출력한다.

RUNOFF 블록에서 지표면유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 kinematic wave 근사법인 비선형 저류방정식이 사용된다. RUNOFF 블록은 각 소유역에서의 수심과 유량을 결정하기 위해 연속방정식과 Manning 식을 사용한다. kinematic wave 근사법은 배수영향이 큰 경우에는 적합하지 않으며 급경사, 완만한 홍수파의 상승구간에 적용이 가능하다. 계산을 수행하는데는 사류부 경계조건만이 필요하고, 각 수로요소는 다른 요소에 대해 독립적인 계단형 수로로 가정한다. RUNOFF 블록에서 지표면유출은 유역면적을 광폭으로 보아 수리반경이 수

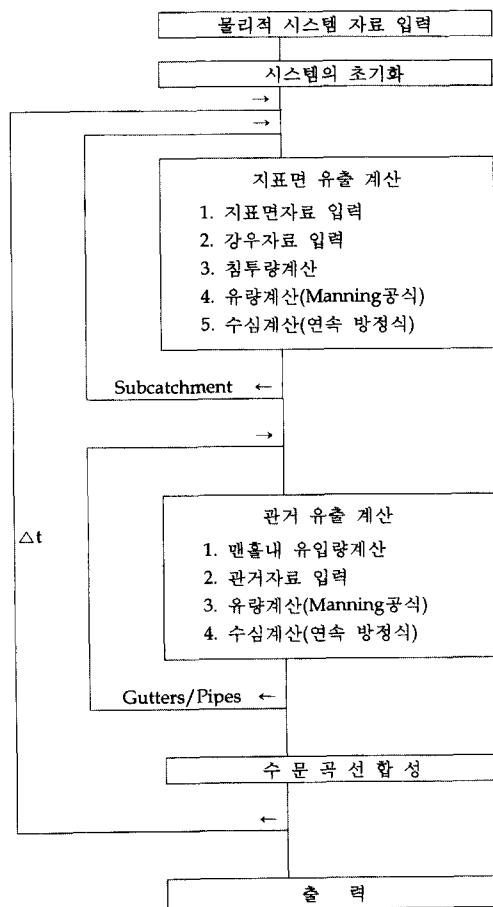


그림 2. SWMM-RUNOFF 블록의 계산흐름도

심과 같다라는 가정 아래 Manning 식을 사용하여 계산한다. 관로유출은 비선형 저류방정식으로부터 계산된다. 본 방정식의 해를 구하기 위하여 모형개발 초기에는 수정 Euler 방법을 사용하였으나, 후에 보다 안정된 해를 얻기 위해 Newton-Raphson 방법으로 대체되었다. Manning 식이 각 적분연산구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동은 준정상(quasi-steady)상태로 근사 처리하였다. RUNOFF 블록의 계산과정을 흐름도로 정리하면 다음 그림 2와 같다(Huber와 Dickinson, 1988; Singh, 1995; 한국수자원학회, 1996).

3. 민감도분석방법의 개발

3.1 민감도분석의 개요

민감도는 다른 요소의 변화에 대한 한 요소의 변화율을

말한다. 이와 같은 정의는 요소라는 표현에 막연함이 있지만 두 개의 미분계수를 의미한다. 민감도방정식은 양 해함수(explicit function) F_0 를 Tayler 시리즈로 전개를 하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_0 = x(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (1)$$

요소 F_0 는 어떤 모형의 결과 또는 모형의 한 성분의 결과이다. 요소 F_i 의 변화에 따른 요소 F_0 의 변화는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} & x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) \\ &= F_0 + \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \Delta F_i + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_0}{\partial F_i^2} \Delta F_i^2 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 F_0 는 각 F_i 의 값에 대한 결과값이다.

만약 비선형항이 선형항과 비교하여 상대적으로 작으면 식 (2)는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) = F_0 + \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (3)$$

따라서

$$\Delta F_0 = x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - F_0 = \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (4)$$

여기서 식 (4)는 선형 민감도방정식이다(McCuen, 1973).

식 (4)는 요소 F_i 의 변화에 따른 요소 F_0 의 변화를 추정할 수 있다. 선형민감도방정식은 한 매개변수가 동시에 변화되는 경우도 전개할 수 있다. 식 (1)과 식 (4)로부터 민감도 S의 일반적 정의는 식 (5)와 같이 유도된다(McCuen, 1973).

$$\begin{aligned} S &= \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \\ &= \frac{x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - x(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 두가지 방법으로 계산할 수 있다. 식 (5)의 좌항은 요소 F_i 의 변화에 대한 F_0 의 민감도로서 각각의 F_i 에 대하여 식 (1)의 양해적 관계를 미분하여 식 (6)

과 같이 추정할 수 있다.

$$S = \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

해석적 미분방법을 이용한 민감도는 수문모형들을 구성하는 식이 복잡하고 요인 F_i 의 수학적 구조가 확실하지 않은 경우가 많으므로 폭넓게 이용되지 않고 있다. 식 (5)의 두번째 계산방법인 요소의 섭동방법(method of factor perturbation)은 수문분석에서 널리 사용되고 있는 방법이다. 식 (5)의 우항은 F_i 의 변화에 대한 민감도는 F_i 를 증가시키고 그 변화에 따른 F_0 를 계산하여 구할 수 있다. 즉 민감도는 두 미소차의 비율이며 유한차분형태로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다 (McCuen, 1973).

$$\begin{aligned} S &= \frac{\Delta F_0}{\Delta F_i} \\ &= \frac{f(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - f(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i} \end{aligned} \quad (7)$$

그러나 다중매개변수시스템에서 민감도분석은 계산량이 많고 모형을 검정하기 위하여 사용된 자료에만 의존하기 때문에 매개변수 섭동방법은 보통 실용적이지 못하다.

앞에서 언급한 민감도분석의 정의, 민감도방정식 및 계산방법을 기초로 하여 민감도분석방법을 분류하면 매개변수민감도와 성분민감도 및 절대민감도와 상대민감도 등이 있으며, 이러한 민감도분석을 이용하여 모형의 상대적 수행능력을 알 수 있다. 특히, 모형의 매개변수 민감도는 모형구조의 정량적 지표와 유역의 수문반응을 나타내기 위한 모형능력의 지표로 사용될 수 있다.

즉, 민감도분석에 의한 평가로 모형의 제한사항 및 모형 적용시 고려사항 파악과 예측치의 결과에 대한 합리성의 판단기준을 제공한다. 또한 민감도분석을 통하여 오차분석을 실시하여 의사결정에 사용되기도 한다.

(1) 구체적인 민감도분석에 의한 평가절차는 먼저 모형의 성분민감도 분석으로 모형구조의 합리성을 파악할 수 있다. 즉, 입력변수에 따른 각 성분의 계산결과를 분석하고 각 성분모형구조의 합리성을 파악하여 비합리적인 성분을 재공식화한다.

(2) 모형에서 이용하고 있는 매개변수에 의한 오차의 크기를 파악하기 위한 절대민감도분석이 있다. 이는 모

형에서 이용하고 있는 매개변수 중에서 가장 큰 출력요인의 원인이 되는 매개변수를 찾으므로써 이 매개변수의 추정에 주의를 기울여야 할 것이다.

(3) 상대민감도분석으로 이는 모형에서 적용되는 매개변수들의 상대적 중요성을 정량적으로 표시하는 것으로 모형의 결과에 상대적으로 큰 영향을 주는 매개변수를 알 수 있다.

3.2 민감도분석방법의 개발

민감도는 앞에서 언급한 대로 절대민감도와 상대민감도로 나눌 수 있으며 식 (5)의 정의에 의하여 계산된 민감도값은 절대민감도이다. 이와 같은 정의는 식 (5)를 이용하여 계산된 값들은 F_0 또는 F_i 의 어느 한 요인의 크기에 따라 일정하지 않기 때문에 민감도값의 비교에 적절하지 못하다. 그러나 식 (5)의 분자를 F_0 로, 분모를 F_i 로 각각 나누면 F_i 의 상대적 변화에 대한 F_0 의 상대적 변화를 식 (8)과 같이 추정할 수 있다.

$$R_s = \frac{\partial F_0 / F_0}{\partial F_i / F_i} = \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \cdot \frac{F_i}{F_0} \quad (8)$$

상대민감도값은 F_0 와 F_i 의 크기에 따라 일정하기 때문에 민감도비교를 위한 유용한 수단을 제공한다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 각 모형별로 중요한 매개변수들을 선정하고 이를 매개변수의 변화에 따른 유출해석을 실시하여 각 매개변수가 모형모의결과에 미치는 영향을 강우지속기간별, 강우분포형별 등에 대해 총유출량비(Q_{TR})와 첨두유출량비(Q_{PR})와 총유출량비를 첨두유출량비로 나눈 비(Q_{TR}/Q_{PR})로 나타낼 수 있는 유출민감도비(Q_{SR})와 같은 새로운 무차원값을 정의하고 이를 이용하여 매개변수간의 상대적인 민감도 정도를 분석하고자 한다(서규우, 1997; McCuen, 1973; Mein과 Brown, 1978).

본 연구에서는 다음 식 (9)~(11)과 같은 총유출량비, 첨두유출량비, 유출민감도비와 같은 무차원값을 이용하여 모형매개변수에 대한 상대적인 민감도분석방법을 적용하였다.

$$\text{총유출량비}(Q_{TR}) = \frac{Q'_{TR}}{(Q_{TR})_{\max}} \quad (9)$$

$$\text{첨두유출량비}(Q_{PR}) = \frac{Q'_{PR}}{(Q_{PR})_{\max}} \quad (10)$$

$$\text{유출민감도비}(Q_{SR}) = \frac{Q_{TR}}{Q_{PR}} \quad (11)$$

여기서 $(Q_{TR})_{\max}$ 는 최대총유출량이고, $(Q_{PR})_{\max}$ 는 최대첨두유출량이고 Q'_{TR} 과 Q'_{PR} 은 각 단계별 총유출량과 첨두유출량이다.

그리고 최대총유출량에 대해 최소총유출량을 갖는 경우의 비율(S_{TR})과 최대첨두유출량에 대해 최소첨두유출량을 갖는 경우의 비율을 민감도비율(S_{PR})로 정의하여 식 (12)~(13)과 같이 나타냈다.

$$\text{총유출량의 민감도비율}(S_{TR}) = \frac{(Q_{TR})_{\min}}{(Q_{TR})_{\max}} \quad (12)$$

$$\text{첨두유출량의 민감도비율}(S_{PR}) = \frac{(Q_{PR})_{\min}}{(Q_{PR})_{\max}} \quad (13)$$

여기서 $(Q_{TR})_{\min}$, $(Q_{PR})_{\min}$ 는 각각 최소총유출량과 최소첨두유출량이다. 모형에서 유출에 영향을 크게 미치는 매개변수에 대해 출력함수로 나타나는 유출량을 총유출량과 첨두유출량으로 나누어 입력함수인 매개변수의 변화에 따른 출력함수의 변화정도를 식 (9)~(13)과 같이 구분하여 산정, 분석하였다.

3.3 민감도분석 절차

본 연구에서 제시한 민감도분석방법의 적용절차를 정리하면 다음과 같다.

(1) 적용모형별 주요 매개변수를 선정한다. 연구목적에 따라 선정되는 매개변수는 달라질 수 있으며 본 연구에서는 도시화환경에서 영향을 미치는 인자들 중에서 선정하였다.

(2) 선정된 매개변수의 적정 적용범위를 정한다. 각 매개변수의 적용가능한 적용범위는 모형에 따라 지침서 등에 제시되어 있는 경우도 있으나, 이는 모형의 조작이나 계산능력에 따른 제한사항과 관련있는 경우가 많다. 본 연구에서는 우리나라의 지형이나 환경여건에서 실제로 발생가능하고 변화가능한 범위내에서 결정하였다.

(3) 결정된 매개변수의 적용범위를 유출이 최소로 발생하는 경우를 1의 단계로, 최대로 발생하는 경우를 8의 단계(혹은 모형매개변수의 특성상 4의 단계)로 등분포간격으로 나누어 산정한다. 이는 임의의 단계변화에 따른 민감도변화까지 도시적으로 확인하기 위해서이다.

(4) 각 모형별로 기준으로 정한 매개변수 각각의 경우

에 대해 한가지 매개변수를 적용범위 첫 단계에서 마지막단계까지 변화를 주면서 유역면적크기와 강우의 지속기간과 강우의 시간적 분포형 별로 유출해석을 실시하여 총유출량과 첨두유출량을 산정한다.

(5) 산정된 유출량을 총유출량과 첨두유출량으로 구분하여 각각의 경우별로 최대값을 분석하고 식 (9)에 의해 총유출량비(Q_{TR})를, 식 (10)에 의해 첨두유출량(Q_{PR})를 매개변수변화에 따라 산정하여 그래프로 나타낸다.

(6) 총유출량의 민감도비율(S_{TR})과 첨두유출량의 민감도비율(S_{PR})을 식 (12)와 (13)에 의해 산정하여 각각의 경우별로 표로 작성, 제시한다.

(7) 각 경우에 대해 일관성을 갖는 매개변수를 분석하여 민감도비율산정식을 작성하여 일반화하므로 유역 크기나 임의의 강우지속기간에 대해 민감도영향을 신속하고 정확하게 산정할 수 있도록 한다.

(8) 각 경우별 총유출량비를 첨두유출량비로 나눈 유출민감도비를 산정한다. 매개변수의 유출민감도비가 1.0보다 클 경우에는 매개변수의 변화로 인한 유출영향에서 총유출량보다 첨두유출량에 더욱 민감함을 나타내고 1.0보다 작을 경우에는 반대로 총유출량이 상대적으로 더 민감함을 나타낸다.

(9) 매개변수의 임의 변화단계에서의 유출민감도비를 총유출량비와 첨두유출량비의 관계로부터 산정할 수 있도록 유출민감도관계식을 작성하여 일반화한다.

3.4 민감도분석 방법

본 연구에서 사용할 매개변수의 변화 단계는 기본적으로 유출량이 가장 크게 산출되는 1단계에서 가장 크게 산출되는 단계사이를 비교분석을 자세하게 하기 위해 총 8단계로 나누어 적용하였다. 그러나 모형의 특성상 입력매개변수의 범위가 4단계로 한정되어있는 경우에는 4단계로 적용하였다. 본 연구에서 사용할 무차원값 중 총유출량비(Q_{TR})는 최종단계의 최대유출용적에 대한 각 단계별 유출 용적의 비로서 0부터 1까지의 값이 가능하나 대개 0.5~1.0의 값을 가지며 이 값이 1에 가까울수록 변화의 폭이 적은 것을 의미한다. 첨두유출량비(Q_{PR})도 최종 단계의 최대첨두유출량에 대한 각 단계별 첨두유출량의 비로서 총유출량비(Q_{TR})와 마찬가지로 대개 0.5~1.0의 값을 가지며 1.0에 가까울수록 변화의 폭이 적은 것을 나타낸다. 총유출량비(Q_{TR})와 첨두유출량비(Q_{PR})는 8단계중 처음 1단계에서의 값이

얼마인가에 따라 전체 변화의 범위가 정해지며 이 범위가 클수록 각 단계별 민감도의 영향이 큰 것으로 볼 수 있으며, 총유출량비(Q_{TR})를 첨두유출량비(Q_{PR})로 나눈 유출민감도비(Q_{SR})는 각 단계에서 첨두유량변화 정도와 총유출량의 변화 정도를 동시에 살펴볼 수 있는 것으로 유출량의 민감도정도를 파악할 수 있다. 즉 유출민감도비(Q_{SR})가 1인 경우 매개변수의 변화에 따라 총유출량과 첨두유출량의 변화 정도가 같은 비로 진행 된다는 의미이고 1보다 큰 경우에는 첨두유출량의 변화가 총유출량의 변화보다 크게 나타나는 것으로 민감도가 상대적으로 큰 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 매개변수의 상대적인 민감도를 총유출량비(Q_{TR}), 첨두유출량비(Q_{PR}), 유출민감도비(Q_{SR}) 등과 같은 무차원값의 변화 정도를 살펴 조사·분석하고자 한다.

4. 모형 매개변수의 선정 및 적용범위

ILLUDAS모형에서는 적용시 여러 종류의 자료를 필요로 한다. 소유역별 자료로 유역면적, 유로길이, 지표면경사 등의 자료는 관련 도면이나 수집된 지형자료를 이용하여 결정하면 변동이 거의 없는 지형적 값들이다. 하수관거의 제원도 소유역의 각 구간별로 하수관망자료를 이용하여 관거의 형식, 제원, 조도계수, 관경사 등의 자료 조사가 이루어지면 고정된다. ILLUDAS모형에서 도시유역의 지표면 포장률 정도는 주 배수관거와 직접 연결되어 있는 비율과 간접연결되어 있는 비율, 녹지역의 비율을 각 소유역별로 입력하게 되어 있어 각 소유역별로 조사를 하여 합리적으로 입력할 수 있으므로 민감도분석시 하나의 매개변수 값이 결정됨에 따라 전체에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위해 포장률의 변화를 민감도분석에서는考慮하지 않고, 다만 소유역별로 입력되는 포장면적률에 대해서는 도시화에 따른 유출영향검토시 적용하여 수문량변화 정도를 분석하기로 한다. 따라서 ILLUDAS 모형의 매개변수들 중에서 유역 전체를 하나의 값으로 대표하는 입력값중에서 유출해석에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소로는 손실량(II)의 가정과 유역의 토양형(JS)결정, 선행토양함수량(IA)선정 등이다. 모형의 지침서와 외국의 적용사례에서 사용된 매개변수의 값들을 참고로 하여 본 연구에서 결정한 매개변수의 각 단계별 적용 값을 보면 다음 표 1과 같다. 초기 손실량(II)의 경우 녹지지역(토수지역)과 포장지역(불투수지역)에 대해 지침서에는 2 in(5.08 mm)와 1

표 1. 주요 매개변수의 변화단계 (ILLUDAS모형)

단계	손실량(II)		선행토양 함수량(IA)	토양형 (IS)
	녹지지역(mm)	포장지역(mm)		
1	8.0	4.00	1	1
2	7.0	3.50		
3	6.0	3.00	2	2
4	5.0	2.50		
5	4.0	2.00	3	3
6	3.0	1.50		
7	2.0	1.00	4	4
8	1.0	0.50		

in(2.54 mm)로 권장되고 있으나 이는 지역의 지표면과 식생상태에 따라 차이가 날 수 있다. 본 연구에서는 4단계의 5.0 mm와 2.5 mm를 기준으로 녹지지역은 1 mm씩, 포장지역은 0.5 mm씩 증감하여 8단계로 나누었다. 물론 이들 값의 다른 조합들이 이론적으로는 가능하지만 그런 현상은 극히 극단적인 경우일 것이므로 본 연구에서는 배제하였다. 선행토양함수량(IA)과 토양형(IS)의 경우 모형내에서 초기함수상태(AMC)에 따라 매우 건조한 단계에서 포화된 단계까지의 4단계 및 침투능에 따른 SCS의 토양형 A, B, C, D 4단계와 관련 시켜 표준침투율곡선을 작성하고 여기서 산출되는 인자들을 4단계로 나누어 각각 선택하고 있다. 그러므로 우리의 지형여건과 선행강우양상에 따라 새로이 작성될 수 있으나 기존의 모형을 그대로 사용할 경우 이들 값들의 분포정도를 우리의 여건과 비교하여 선택할 수도 있다. 본 연구에서는 모형 매개변수의 민감도분석이 주된 것이므로 기존의 4단계를 어떻게 조화시켜 적용하는 가에 따른 변화양상을 분석하였다.

SWMM모형의 경우 본 연구에서 적용한 모형중 가장 많은 입력 자료를 준비해야 하는 모형으로 소유역별 지형 자료로 소유역면적, 유입구, 유역폭, 불투수율, 지표면 경사, 조도계수, 손실량(저류 깊이) 등의 자료와 배수

관거 계통별 제원 등의 자료가 필요하다. 대상 유역의 관련 자료를 이용해 입력 값들을 결정하는데 있어 침투능(SI)과 조도계수(SR), 그리고 손실저류깊이(SS) 등은 다른 자료들에 비해 가정을 하거나 설정하는데 있어 유출량에 영향을 많이 미치는 매개변수들이다. 이를 중심으로 SWMM 모형에서의 매개변수 민감도분석을 실시하기 위해 주요 매개변수의 단계별 적용 값을 보면 다음 표 2와 같다. 침투능(SI)의 경우 Horton의식을 사용하였으며 이때 초기침투능과 종기침투능의 값을 결정하는데 있어 특정강우에 다른 침투능분석자료를 이용하여 적용값을 선정하고 있으며 이런 실제자료가 없을 경우 지침서에서 통상 초기침투능의 경우 1.0~3 in, 종기침투능의 경우 1~0.1 in 정도인 바 본 연구에서는 초기의 경우 254.0~76.2 mm 정도, 종기의 경우 25.4~2.54 mm 정도로 결정하여 8단계로 나누었다. 조도계수(SR)의 경우 불투수지역의 하수관거가 대부분 콘크리트로 되어있으므로 콘크리트관의 조도계수인 0.013과 투수지역의 자연하천수로인 경우 0.03~0.06 정도이므로 이들 값들을 포함하여 투수지역의 경우 0.09~0.02, 불투수지역의 경우 0.018~0.011의 범위를 8단계로 나누었다. 손실저류깊이(SS)의 경우 ILLUDAS모형의 초기손실량과 거의 같기 때문에 ILLUDAS모형과의 상호 비교를 위해 투수지역과 불투수지역으로 구분하여 똑같이 적용하였다.

마지막으로 민감도분석을 위한 유출해석시 기준으로 적용한 설계수분량은 다음과 같다. 설계강우량은 재현기간 10년, 강우지속기간 60, 120, 180분 3가지에 대해 산정된 강우량을, 강우의 시간적 분포는 Huff의 4분위법(Huff, 1967; 1990)으로 분포시킨 값들을 기본적인 자료로 사용하였다(한국건설기술연구원, 1989).

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라에 있어 도시화지역의 수문현

표 2. 주요 매개변수의 변화 단계 (SWMM모형)

단계	침투능(SI)		조도계수(SR)		손실 저류깊이(SS)	
	초기(mm/hr)	종기(mm/hr)	투수지역	불투수지역	투수지역(mm)	불투수지역(mm)
1	254.0	25.4	0.09	0.018	8.0	4.00
2	228.0	19.05	0.08	0.017	7.0	3.50
3	203.2	12.70	0.07	0.016	6.0	3.00
4	177.8	10.16	0.06	0.015	5.0	2.50
5	152.4	8.13	0.05	0.014	4.0	2.00
6	127.0	6.35	0.04	0.013	3.0	1.50
7	101.6	4.32	0.03	0.012	2.0	1.00
8	76.20	2.54	0.02	0.011	1.0	0.50

상의 변화를 해석하기 위해 ILLUDAS모형과 SWMM모형을 선정하고 각 모형의 주요 매개변수들에 대해 유역 특성의 변화에 따른 매개변수의 상대적인 민감도분석을 실시하기 위해 새로운 무차원값으로 총유출량비, 첨두유출량비, 유출민감도비를 다음과 같이 제안하였다.

$$\text{총유출량비}(Q_{TR}) = \frac{Q'_{TR}}{(Q_{TR})_{\max}}$$

$$\text{첨두유출량비}(Q_{PR}) = \frac{Q'_{PR}}{(Q_{PR})_{\max}}$$

$$\text{유출민감도비}(Q_{SR}) = \frac{Q_{TR}}{Q_{PR}}$$

여기서 $(Q_{TR})_{\max}$ 는 최대총유출량이고, $(Q_{PR})_{\max}$ 는 최대첨두유출량이고 Q'_{TR} 과 Q'_{PR} 은 각 단계별 총유출량과 첨두유출량이다.

그리고 최대총유출량에 대해 최소총유출량을 갖는 경우의 비율(S_{TR})과 최대첨두유출량에 대해 최소첨두유출량을 갖는 경우의 비율을 민감도비율(S_{PR})로 제안하였다.

$$\text{총유출량의 민감도비율}(S_{TR}) = \frac{(Q_{TR})_{\min}}{(Q_{TR})_{\max}}$$

$$\text{첨두유출량의 민감도비율}(S_{PR}) = \frac{(Q_{PR})_{\min}}{(Q_{PR})_{\max}}$$

여기서 $(Q_{TR})_{\min}$, $(Q_{PR})_{\min}$ 는 각각 최소총유출량과 최소첨두유출량이다.

또한 ILLUDAS모형의 매개변수로 손설량(II), 선행토양 함유량(IA), 토양형(IS)을 선정하고, SWMM모형의 매개변수로는 침투능(SI), 조도계수(SR), 손실저류깊이(SS)을 선정하고 선정된 각 매개변수별 적정 적용범위를 8단계와 4단계로 나누어 제시하였다.

본 연구결과를 바탕으로 모형별로 우리의 지형여건 및 유역개발상황에 합리적으로 적용할 수 있도록 하여 도시유출모형 확립의 기초를 마련할 수 있도록 하였다.

참 고 문 헌

- 대한주택공사 (1995). 인천부개지구 침수원인조사 및 장기종합대책 수립에 관한 연구와 이에 따른 실시 설계 종합보고서.
- 서규우 (1997). 도시유출모형의 매개변수결정을 위한 민감도분석 연구. 박사학위논문, 연세대학교.

서규우, 배덕호, 심재현, 이재준 (1996a). “유역개발에 따른 도시하천에서의 유출량 및 도달시간변화에 관한 연구.” 한국수자원학회지, 제29권 제3호, pp. 207-216.

서규우, 허준행, 조원철 (1996b). “도시화에 따른 유출 영향분석 및 침수저감대책에 관한 연구.” 대한토목학회 논문집, 제16권 제II-5호, pp. 421-431.

한국건설기술연구원 (1989). 지역별 설계강우의 시간적 분포 건기연89-WR-111 연구보고서.

한국건설기술연구원 (1992). 수문모형평가에 관한 연구 -강우유출모형을 중심으로-.” 건기연92-WR-111-2, 연구보고서.

한국수자원학회 (1996). “2. 도시유역에서의 배수계통의 설계를 위한 SWMM모형.” 제4회 수공학워샵.

한국토지개발공사 (1989). 도시소규모단지의 우수유출량 산정기법에 관한 연구. 연구보고서.

한국토지공사 (1996). 주택단지내 수문자료 모니터링 시스템 구축에 관한 연구.” 연구보고서.

Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill, Inc., New York.

Hicks, W.I. (1944). “A method of computing urban runoff.” *Trans. ASCE*, Vol. 109, pp. 1217-1253.

Holtan, H. N. (1961). “A concept for infiltration estimates in watershed engineering.” U.S. Dept. of Agr., ARS, pp. 41-51.

Horton, R.E. (1933). “The role of infiltration in the hydrologic cycle.” *Trans. AGU*, Vol. 14, pp. 446-460.

Huber, W.C., Dickinson, R.E. (1988). *Storm water management model*. Ver. 4, Part A, User's Manual, EPA-600/3-88/001a, U. S. EPA.

Huff, F.A. (1967). Time distributions of heavy storms.” *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.

Huff, F.A. (1990). *Time distributions of heavy rainstorms in Illinois*. State of Illinois, Water Survey, ISWS/CIR-173/90, Circular 173.

Kibler, D.F. (1982). *Urban stormwater hydrology*. Water Resources Monograph 7, AGU, Washington, D. C., pp. 10-12.

McCuen, R.H. (1973). “The role of sensitivity

- analysis in hydrologic modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 18, pp. 37-53.
- Mein, R.G., and Brown, B.M. (1978). "Sensitivity of optimized parameters in watershed models." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 299-303.
- Singh, V.P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications.
- Terstriep, M.L. and Stall, J.B. (1974). *The Illinois urban drainage area simulator*. ILLUDAS, Bulletin 58, State Wat. Surv., Urbana, Illinois.

<최종본 접수일 : 1998년 4월 1일>