

추론모형을 통한 강우-유출모형 매개변수의 간접추정법 적용 Application of Inference Models for Estimating Parameters of a Catchment Modelling System

최 경 숙*

Choi, Kyung-Sook

Abstract

Application of a catchment modelling system requires recorded information to ascertain the reliability and robustness of the predicted flow conditions. Where this recorded information is not available, the necessary information for reliable and robust predictions must be obtained from other available information sources. The alternative approach presented in this paper used inference models for getting this necessary information that is required to calibrate and validate the catchment modelling system for both an ungauged and a gauged catchments. In this study, inference models were developed for determination of control parameters of the Storm Water Management Model (SWMM), mainly based on landuse component of the catchment, which is a major factor to impact on quantity and quality of catchment runoff. Results from the study show that the new approach for determination of the spatially variable control parameters produced more accurate estimates than a traditional approach. Also, the number of control parameters estimated can be reduced significantly as the proposed method only requires determination of control parameters associated with each land use of the catchment while a traditional approach needs to assign a number of control parameters for a number of subcatchment.

Keyword : Control parameters, Parameter estimation, Inference models, Catchment modelling system, SWMM

요 지

모델의 적용에 있어서 안정성과 신뢰성 있는 예측치를 얻기 위해서는 그 유역의 장기간의 강우-유출 기록자료들이 필요하다. 그러나 대부분의 유역들은 계측이 이루어지지 않아 수문기록 자료들을 전혀 보유하고 있지 않거나, 설사 있다하더라도 모델검정에 필요한 충분한 자료들을 보유하고 있지 않은 실정이므로 이러한 유역들에 있어 모델적용은 상당한 어려움을 수반한다. 본 연구에서는 이러한 미계측 유역 및 기록자료들이 미비한 계측유역의 모델 적용에 있어서 정확한 모델변수추정을 피하고 이로 인한 모델의 신뢰도를 높이기 위하여 추론모형을 통한 매개변수추정을 도모한 간접추정법을 개발하였다. 수량 및 수질 모의에 가장 민감하게 영향을 미치는 토지이용인자를 주요소로 하여 유도된 추론 모델은 현재 널리 사용되고 있는 SWMM(Storm Water Management Model)의 매개변수 추정에 사용할 수 있도록 유도되었으며, 추론모델의 적용성 효과를 최대화하기 위하여 추론모델에 필요한

* Consultant, Sydney Water Corporation, Australia
(E mail : ks_choi@hotmail.com)

유역의 지형특성인자들은 지리정보시스템을 이용하여 추출하였다. 제안된 방법의 적용성 실험은 호주 시드니에 위치한 센테니얼 파크 유역 (Centennial Park catchment)을 대상으로 하였다. 간접추정법을 적용한 경우 기존의 모델 검증방법을 통해 모델 변수를 추정할 경우보다 모델 예측치의 신뢰도를 월등히 높일 수 있었음은 물론, 제안된 추정법의 적용에 의한 각 소유역내의 상당한 수의 지형특성변수들의 추정에 드는 엄청난 시간과 노력을 최소화할 수 있었다.

핵심용어 : 매개변수, 변수추정, 추론모델, 간접추정법, SWMM

1. 서론

지금까지 상당한 수의 개념적 모델들이 유역내의 강우 유출현상을 모의하기 위하여 개발되어 왔으며 이러한 모델의 이용을 통하여 수문현상을 추정하는 것이 현재는 전 세계적으로 보편화되었다. 따라서, 모델 이용성의 증가와 더불어 그에 따른 모델 예측치의 신뢰도 향상 역시 중요한 관심사가 아닐 수 없다. 특히, 모델들은 유출현상의 거동을 모의하기 위하여 유역의 지리적 및 수문기상학적 특성을 잘 대표하는 변수의 추정을 필요로 하는 데, 이러한 모델변수 추정의 정확도가 모델 예측치의 신뢰도를 확정한다고 해도 과언은 아니다. 모델의 신뢰도는 그 모델의 계산치가 얼마나 관측치에 가깝게 근사값을 도출해 내는 가의 정도를 나타내며, 모델 신뢰도를 결정하는 핵심요소는 모델검정과정(calibration process)을 통한 정확한 모델 매개변수 추정이다.

모델의 검증은 계측유역의 경우 유역의 지형특성에 따라 변수의 초기치를 추정하고, 그 유역내의 수문 관측자료들을 이용하여 모델의 예측치와의 비교분석과정에서 변수값의 수정에 의한 관측치와 예측치와의 오차를 최소화하는 과정에서 최적의 변수값을 얻어내는 절차이다. 그러나, 미계측 유역 (ungauged catchment)의 경우, 유역내의 수문기록 자료들이 없으므로 모델의 검증은 단지 변수추정의 초기치 결정에 국한되며, 위와 같은 방법으로는 변수추정이 불가능하므로 다른 방법을 통하여 모델의 변수추정이 이루어져야 하는데 기존의 미계측 유역내 변수추정은 다음과 같은 방법으로 이루어졌다 (Philgrim, 1987).

- ▶ 유역의 물리적 특징에 기초한 주관적 추정 (추측)
- ▶ 매개변수와 유역의 지형특성간의 관계 (regional relationships) 이용
- ▶ 유역특성이 유사한 이웃유역의 변수 값을 참고로 한 변수추정

이 세가지 방법들의 공통점은 모두 모델변수 추정을 위해 유역의 물리적 특성(physical catchment characteristics)에 기초한 추론모델 (inference model)을 사용한다는 점이다. 따라서, 추정된 변수의 정확성(accuracy)과 신뢰도(reliability)는 그 유역이 얼마만큼 정확한 지리정보(spatial information)를 확보하고 있으며, 또 얼마만큼 이러한 정보들을 효과적으로 변수추정에 사용할 수 있는 지에 달려있다. 이러한 실정과 더불어 현재 지리정보시스템의 응용에 의한 유역의 특성인자를 나타내는 모델 매개변수의 자동 추출이 활발히 강우-유출 분석에 이용되고 있다. 이러한 경우, 모델의 복잡성 (complexity) 정도에 따라 필요한 유역 정보의 양 또한 다르게 요구되어지며, 따라서 모델의 복잡성에 따라 얼마나 수준 높은 유역의 정보 구축이 요구되어지는 가가 결정된다. 특히 현재 강우-유출 모의 뿐 만 아니라 우수로 인한 수질의 비오점 오염 (non-point source pollution)의 모의에 널리 사용되고 있는 분포형모델 (distributed models)들은 상당한 수의 공간적 변수 지정을 요하므로, 이에 따른 유역의 정보 구축에 드는 시간적, 경제적 노력은 상당하다. 또한 대부분의 유역들은 실제적으로 이러한 밀도 높은 공간적 변수 추정에 필요한 충분한 정보를 확보하고 있지 않은 실정이므로 모델이 요구하는 모든 매개변수들의 정확한 추정을 획득하기에 상당한 어려움이 따른다. 따라서 본 연구는 기존의 지리정보시스템을 이용한 변수 추정 방법의 효과를 극대화하고 제한된 유역의 정보를 효과적이고 능률적으로 활용하기 위하여 유역내 지형특성을 고려한 새로운 추론 모델들을 유도하였으며, 이의 적용을 통해 보다 정확한 변수추정을 꾀하고 신뢰도 높은 모의 결과를 얻고자 하였다. 본 연구에서 제안한 추론모델을 통한 매개변수의 간접추정법은 SWMM 모델을 이용하여 개발되었으며 기존의 미계측유역의 매개변수 추정방법의 개선과 모델검정에 사용할 만한 충분한 정보를 보유하고 있지 않은 유역의 모델변수추정의 신뢰도를 높이는데 그 목적이 있다.

2. 변수의 분류 및 검정방법

모델의 변수는 검정을 위한 목적으로 크게 두 분류로 나눌 수 있다. 첫 번째 분류는 측정된 변수(measured parameters)로서 강우량, 토양 종류, 유역 면적, 관의 지름 등이 이에 해당되며, 두 번째 분류는 이러한 측정된 변수들을 이용하거나 또 다른 모델의 적용을 통해 추론된 변수(inferred parameters)로서 저류량(depression storage), Manning의 조도계수, 강우강도, 유역의 불투수성비 등을 들 수 있다. 따라서 추론 변수들은 유역의 물리적 조건(physical conditions)의 근사치이므로 이 변수들은 측정 변수들

에 비하여 신뢰도가 낮으며, 그러므로 반드시 검정과정을 통하여 정확한 변수값을 지정해 주어야 한다. 본 연구에서는 변수들의 검정에 있어서 측정 변수들은 오차가 없으며 유역의 상태(catchment conditions)를 대표하는데 하자가 없는 것으로 간주하고 추론 변수만을 검정과정에 포함하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 SWMM의 Runoff Block에 쓰여지는 변수들을 위의 두 분류로 나눈 것이다. 이 변수들은 유역의 여러 가지 특성인자들에 의해 그 값이 영향을 받는데 표 2는 각각의 변수들에 영향을 미치는 인자들을 보여주고 있다. 공간데이터베이스(spatial database)에 저장되어 있는 이러한 지배 인자들을 이용하여 매개변수를 추정하

표 1. SWMM 모델 Runoff Block 내의 매개변수들(quantity part)

측정변수 (Measured Parameter)	추론변수 (Inferred Parameter)
소유역 면적 소유역 경사 수로/관 길이 수로/관 형태 및 하상경사 도수로 형상 맨홀 형태 유역 토양형 유역 토지이용형 강우깊이	불투수 특성 인자 소유역 길이/폭 비율 최대 및 최소 (초기 및 종기) 침투율 불투수조도계수 투수조도계수 불투수저류량 (impervious area detention storage) 투수저류량 (pervious area detention storage) 소유역 불투수비 (percentage of imperviousness) 관 조도계수 침투능 곡선의 쇠퇴율 (decay rate)

표 2. 매개변수에 영향을 미치는 인자들

매개변수 (Control Parameter)	주요 지배 인자 (Influential Factor)	
소유역 폭	소유역 면적, 지형학적 특성, 지표류장 (overland flow length)	
소유역 불투수성비(impervious fraction)	토지이용상태, 선행도양함수조건 (AMC), 불투수성백분율(percentage of imperviousness),	
저류량(depression storage)	투수성 부분 (pervious area)	토양형 식생피복(surface vegetation) 선행상태(antecedent conditions) 차단 (interception) 침투
	불투수성 부분 (impervious area)	차단 선행상태
Manning 조도계수	투수성 부분	식생 종류, 토양형 (지표 피복 상태)
	불투수성 부분	지붕 및 도로 재료 종류
	배수조직	수로 및 관 종류
Horton 의 침투율	f_c (초기함수율): 토양형 f_o (종기함수율): 토양형, 투수함수비, 식생피복상태 k (쇠퇴율): 초기함수비 (지표습도: surface wetness)	
경 사	표고차 (elevation difference), 지표류장	

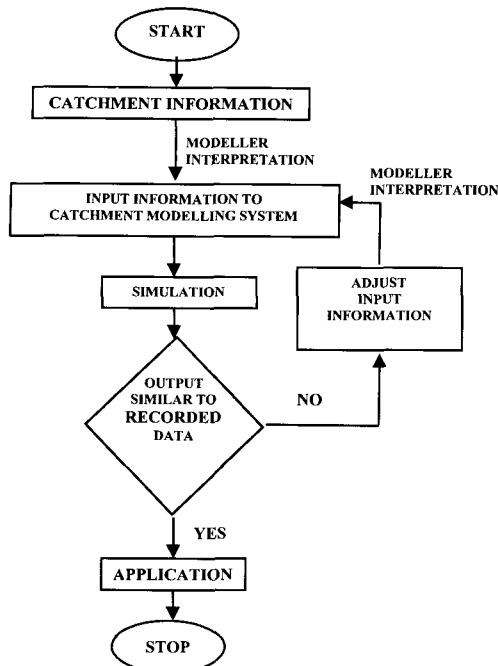


그림 1. 기존의 검정방법 순서도

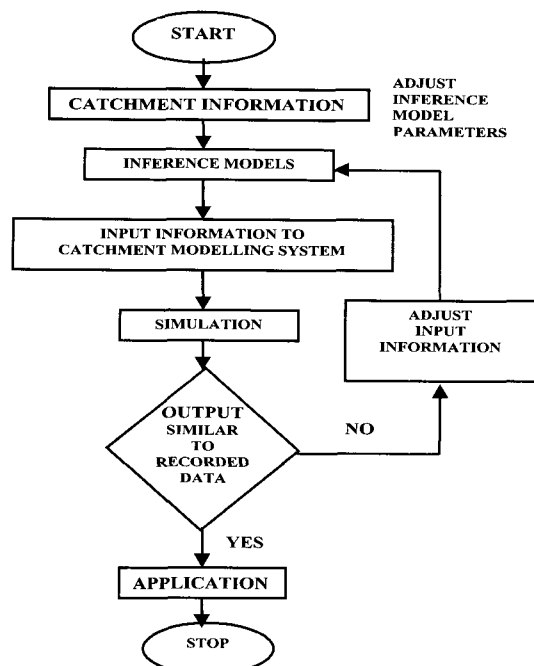


그림 2. 제안된 검정방법 순서도

기 위해서는 지배인자들의 정보를 변수의 값으로 전환시킬 추론모델이 필요하다.

그림 1은 기존의 모델 검정 방법을 나타내며, 그림 2는 추론모델을 통한 간접추정법에 의한 모델검정방법을 나타내고 있다. 그림 1에서 보여주는 기존의 검정방법은 유역의 정보를 이용하여 매개변수 초기치를 추정하고 시행 착오법 (trial and error method) 혹은 자동검정법 (automatic calibration: optimisation technique)을 이용하여 만족할 만한 예측결과를 얻을 때까지 지속적으로 변수의 값을 반복하여 변화시켜줌으로서 최적의 변수값을 찾는 것인데, 이러한 방법은 앞서 언급한 바와 같이 분포형 모델의 경우, 상당한 수의 공간적 변수 지정에 필요 되어지는 정보의 부족 혹은 부적절한 정보로 인하여 각 변수값의 정확한 추정에 상당한 어려움이 따른다. 그러나 그림 2에서 보여주는 제안된 검정방법은 모델의 매개변수 추정에 응용될 추론모델의 적용을 통한 간접추정법으로 모델이 요구하는 공간변수들을 추정하는 것으로서, 이 방법은 단지 추론모델에 필요한 유역의 정보만을 제공해 줌으로서 각 공간적 변수 지정에 필요한 엄청난 정보의 양을 줄이고, 제한된 정보의 효과적 이용을 통하여 최적의 변수값을 얻어 낼 수 있다.

참고로 본 논문에서는 매개변수의 초기치 추정의 정확성에 초점을 두고 있으므로 반복적인 모델검정을 통한 변수수정은 다루지 않음을 밝히는 바이다.

3. 추론모델의 유도

본 연구의 추론모델 유도에 사용된 SWMM은 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발한 분포형 모델로서, 강우 유출 및 그 유출로 인하여 발생하는 수질오염의 예측까지 모의할 수 있으며 호우 사상별 모의 및 연속모의가 가능하다. 모의방식은 유역의 물리적 특성이 동일한 부분으로 나누어진 소유역을 각각 모의하여 전체 유역내의 수문학적 반응 결과를 도출한다. 유역의 물리적 특성의 동질성은 지표유출의 지배인자들 즉 불투수성 및 투수성 지역의 면적, 경사, 폭, 저류량, 조도계수 그리고 침투율 등에 의해서 결정되며, 따라서 나누어진 각 소유역별 매개변수들은 그 소유역 특성을 대표하는 인자들이므로 소유역의 매개변수들은 소유역특성에 따라 각각 다른 값을 가지며 이에 따라 전체 추정해야 할 변수들의 수는 소유역의 수에 비례하여 증가한다.

본 연구에서는 이러한 SWMM 모델의 적용에 있어서 매개변수지정의 정확성을 기하고자 수량 및 수질 모

의에 가장 민감하게 영향을 미치는 토지이용인자를 주요요소로 하여 추론모형을 유도하였다. 특히 불투수 변수(parameters of impervious area)들은 도시 유출현상에 상당히 영향을 미치는 인자이며, 따라서 이 유출에 의해 발생하는 수질오염 모의에도 중요한 역할을 하는 인자이다. 각 소유역내 불투수 면적비율(percentage of impervious area)은 Zaghoul (1981), Huber and Dickinson (1988), Baffaut and Delleur (1989), Liang et al.(1991), Ibrahim and Liang (1992), Zaman (1993), Abustan (1997) 등의 연구사례에서도 나타난 바와 같이 유출 및 침투유량의 결과에 최적으로 민감한 변수로서 성공적인 모델검정을 획득하기 위해서 가장 중요하게 다루어져야 할 인자로 확인되었다. 또 Manning의 조도계수 및 저류량 변수는 침투유량 및 유출용량에 각각 크게 영향을 미치며, 비록 다른 변수들에 비하여 물리적 의미는 적지만 소유역의 폭 역시 침투유량 결정에 상당히 영향을 미치는 변수로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 각 소유역의 불투수 변수들을 중점으로 하여 추론모형을 유도하였으며, 불투수 변수들 중에서도 각 소유역내의 불투수비를 가장 주요한 변수로 보고 소유역의 불투수비를 구하는 추론모형을 식 (1)과 같이 유도하였다.

$$im = \frac{\sum A_{Li} \times im_{Li}}{A} \quad (1)$$

where im : 소유역별 불투수비
 A : 소유역 면적
 A_{Li} : 소유역내의 각 토지이용 면적
 im_{Li} : 토지이용별 불투수비

실제 소유역은 여러 가지 토지이용 형태로 구성되어 있으며, 각 토지이용별 불투수비 또한 다르기 때문에 전체 소유역별 불투수비의 정확하고 객관적인 추정은 상당히 어렵다. 식(1)의 추론모형은 이러한 기존의 각 소유역별 불투수비율을 직접적으로 추정하는 것을 지양하고, 토지이용별 불투수비율을 먼저 추정한 다음, 각 소유역내의 같은 토지이용에서는 같은 불투수비를 적용하여 소유역별 불투수비를 지정하였다. 따라서, 이러한 간접추정법은 추정해야 할 변수의 수를 소유역별 수에서 유역의 토지이용별 수로 감소시킴과 동시에 이 매개 변수의 일괄적이고 주관적인 소유역단위의 추정보다 분포적이고 객관적 추정방법을 통해 좀 더 정확한 변수의

추정을 도모 하고자 하였다. 물론 같은 토지이용이라도 각 소유역별로 약간의 다른 불투수비를 가질 수는 있겠지만 한 유역내의 주거환경 및 토지이용 특성은 거의 유사하므로 토지이용별 불투수비의 소유역간 차이는 사실 경미하다.

식 (1)에서 소유역의 면적과 그 소유역내의 각각의 토지이용 실태 및 이용면적은 지리정보시스템을 이용하여 쉽게 구할 수 있으므로 각 토지이용별 불투수비만을 구하여 그 소유역내에 이용되고 있는 각각의 토지이용 면적에 이 비율을 가중하면 소유역 전체의 유효 불투수 면적(effective impervious area)을 구할 수 있게 된다. 따라서 전체 유역의 유효 불투수 면적은 위에서 구해진 각 소유역의 유효 불투수 면적을 총합하면 구할 수 있게 된다.

이와 같은 개념으로 다른 변수들의 값도 추론해 낼 수 있는데 Manning의 불투수 조도계수 및 불투수지역의 저류량 변수들이 이에 해당된다. 식 (2)와 (3)은 이 두 변수들을 구하기 위해 유도된 추론모형들이다.

$$n = \frac{\sum A_{imLi} \times n_{Li}}{A_{im}} \quad (2)$$

where n : 소유역별 Manning의 불투수조도계수
 A_{im} : 소유역내 불투수면적
 A_{imLi} : 소유역내의 토지이용별 불투수면적
 n_{Li} : 토지이용별 Manning의 불투수조도계수

$$dp = \frac{\sum A_{imLi} \times dp_{Li}}{A_{im}} \quad (3)$$

where dp : 소유역별 불투수지역의 저류량
 A_{im} : 소유역내 불투수면적
 A_{imLi} : 소유역내의 토지이용별 불투수면적
 dp_{Li} : 토지이용별 불투수지역의 저류량

식(1)과 마찬가지로 식(2)와 (3)에서도 각각의 변수들을 소유역단위로 추정하는 것이 아니라 토지이용단위로 추정하여 소유역별 값을 얻어내고자 한 것이다. 따라서 모델변수들의 기존 소유역별 일관형 추정방법에서 좀더 분포형 추정방법으로 접근하였으며 추정하여야 할 변수의 수도 이러한 추론모형의 적용으로 상당히 줄일 수 있어서 변수추정에 드는 시간적, 경제적인 노력을

최소화 할 수 있다.

본 연구에서는 또한 소유역의 폭을 구하는 추론모델을 식 (4)와 같이 유도하였다. SWMM에 사용되는 소유역 폭은 개념적 의미로서, 소유역의 면적과 소유역의 지표류장(overland flow length)의 값에 영향을 받는다. 여기서 소유역의 면적은 지리정보시스템을 통하여 알 수 있으며, 표면유출장 역시 지리정보시스템을 이용하여 주배수수로(main drainage channel)로부터 소유역 경계까지의 최대장(maximum distance)을 구하여 표면유출장의 초기치로 추정하였다.

$$W = \frac{A}{L} \quad (4)$$

where W : 소유역폭

A : 소유역 면적

L : 소유역의 지표류장

4. 적용대상유역

전절에서 유도한 추론 모델들의 적용성을 실험하기 위하여 호주 시드니 동부쪽에 위치한 센테니얼 파크 유역(Centennial Park catchment)을 대상유역으로 삼았다(그림 3). 이 유역 전체면적은 132.7 ha 이며, 상당히 도시화된 주거지역으로서 분리식 배수조직

(separate drainage system)을 사용하고 있다. 유역 내 토지이용현황은 그림 4에서 보여주는 바와 같으며, 각 토지이용별 면적과 전체면적에 대한 토지 이용 비율은 표 3에 나타내었다. 약 40%의 토지가 주거지역으로 이용되고 있으며 이 지역들은 도로 및 교통전용지역과 더불어 유효 불투수 지역으로서 우수에 의한 유출 발생에 상당한 기여를 하고 있다. 유역내의 불투수 면적은 전체 유역면적의 35.2%을 차지하고 있다. 유역내 지질학적 특성은 주로 Hammondville (85%) 과 Moore (15%) 타입의 토양으로 구성된 Botany sands이다.

위에서 언급 한 바와 같이 센테니얼 파크 유역은 분리식 배수조직을 가지고 있으며 우수 배수관은 제형수로 혹은 박스형 암거, 원형관, 개수로 등으로 다양하게 구성되어 있다. 전체 우수 배수로의 길이는 유역의 상류로부터 유역출구까지 약 5.2 km로서, 각 소유역별로는 24.1 m 에서 258.2 m 배수로 길이를 가진다. 유역내의 배수망은 그림 5에서 보여지는 것과 같다. 유역전체의 평균경사는 약 5.3% 이며, 각 소유역의 평균경사는 0.49%에서 12.4%의 범위를 가진다. 모의를 위하여 유역은 토지이용상황 및 유출의 배수 방향 등을 조사하여 조밀하게 42 개의 소유역으로 구분되었으며(그림 5), 각 소유역의 면적은 최소 0.5 ha에서 최대 27.3 ha의 크기를 가진다.

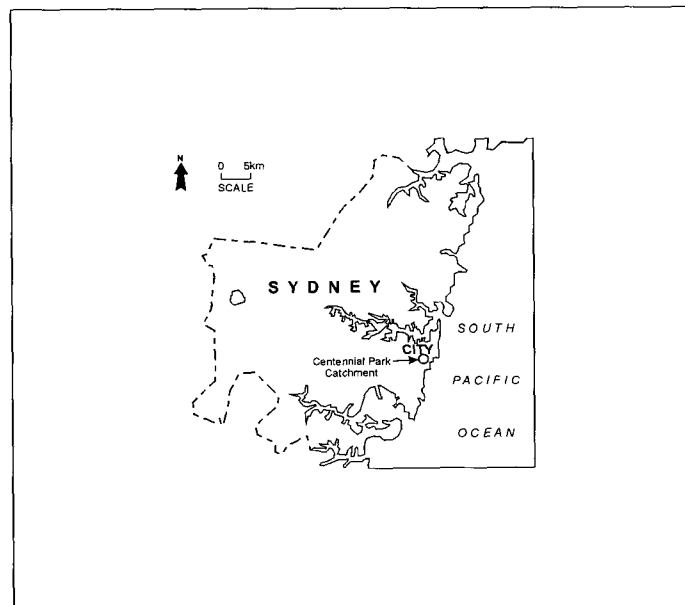


그림 3. 센테니얼 파크 유역의 위치

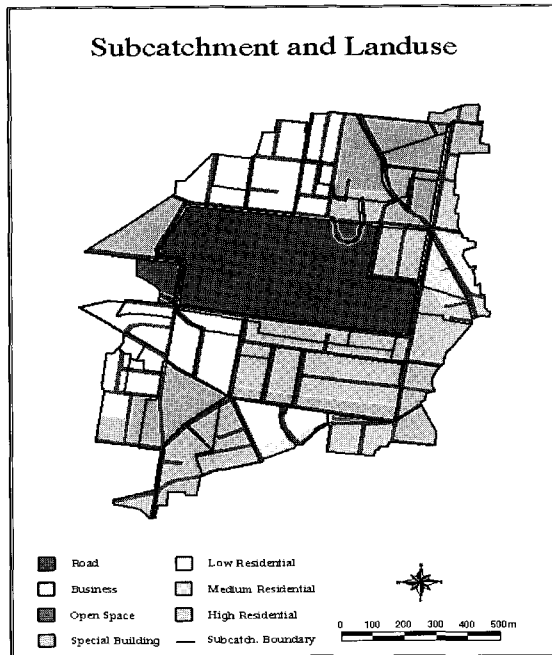


그림 4. 유역내의 토지이용도

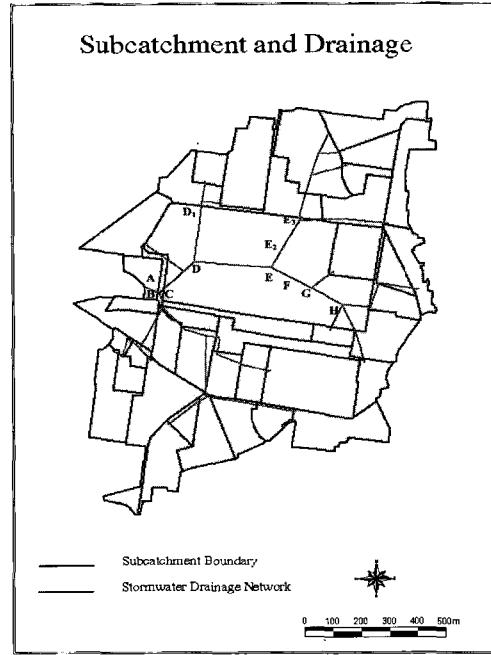


그림 5. 유역내의 배수조직 및 소유역구분도

표 3. 센테니얼 파크 유역의 토지이용 현황

토지이용형태	면적 (ha)	비율 (%)
특별빌딩지역 (Special building): 병원, 학교	16.5	12.4
도로 및 교통전용지역 (road and street)	30.8	23.2
저밀도 주거지역 (low residential)	21.6	16.3
중밀도 주거지역 (medium residential)	20.8	15.7
고밀도 주거지역 (high residential)	10.8	8.1
공원 및 나대지역 (open space and park)	28.7	21.6
상업지역 (commercial/business)	3.5	2.7
합 계	132.7	100

5. 추론모델의 적용 및 비교검토

유도된 추론모델의 적용을 위해 본 연구에서는 추론 모델의 수학적 알고리즘을 담은 새로운 서브루틴을 개발하여 SWMM 모델에 첨가하였다. 또한 간접추정법에 의한 정확한 매개변수추정을 도모하기 위하여 추론

모델에 필요한 유역의 지형특성인자들은 지리정보시스템(Arc/Info)을 이용하여 도출하였다. 유역내의 강우-유출 현상을 모의하기 위하여 사용된 수문 자료들은 HYDSYS (Temporal information system - hydrometric time series database)에서 추출하였으며, 5분간격의 순간강우 값으로 추출한 네 개의 호우사

표 4. 검정사상의 특성

강우사상	강우량 (mm)	유출량 (m ³)	첨두유량 (m ³ /s)	AMC
Oct. 21, 94	8.2	3047.4	0.726	Dry
Nov. 04, 94	4.0	1886.1	0.849	Dry
Jan. 02, 95	7.8	786.0	0.512	Rather Dry
Jan. 04, 95	8.6	3198.0	1.529	Wet

상은 표 4에 나타난 바와 같다. 유역내의 불투수 지역에서 발생하는 유출은 대부분 소규모 강우에 기인하므로 유도된 불투수 매개변수들의 정확한 검정을 위해 본 연구에서는 소규모 강우만을 선택하여 모의하였다. 표 4에 나타난 선행 함수조건(AMC)은 24시간 이내의 총 강우량을 기준으로 하여 분류하였다.

유출량과 침투유량의 모의 결과는 Runoff Block과 Transport Block을 사용하여 얻어졌으며, 그 결과들은 기존의 소유역별 변수 추정방법을 이용하여 얻어진 Abustan (1997)의 결과와 비교분석 하였다. 여기서 Abustan의 경우 본 연구에서 유도한 매개변수만을 고려하면 총 168 개, 즉 42 (소유역수)×4 (매개변수), 의 변수를 지정해 주어야하며, 추론모델을 적용한 경우 61 개, 즉 5 (토지이용별 불투수비 변수: 도로 및 교통전용 지역과 공원 및 나대지역은 100%와 0%로 고정시켰음) + 7 (토지이용별 수)×2 (Manning의 조도계수와 저류량 변수)+42 (소유역폭),의 변수지정만을 필요로 하게 된다.

표 5와 6은 이 두 방법에 의해서 얻어진 결과들을 나타내고 있다. 첫 번째 열의 결과는 기존의 추정방법에 의해 얻어진 값이며 두 번째 열의 결과는 간접추정법 의해 얻어진 값이다. 이 두 표에서 보여지는 바와 같이 유출량과 침투유량 모두 간접추정법에 의해 얻어진 결과들이 전반적으로 훨씬 나았다. 표 5와 같이 유출량의 경우, 기존의 방법은 11.7~36.6%의 상대오차

와 이에 대한 평균값은 26.1%를 나타내었으며, 간접추정법의 경우는 상대오차가 6.2~17.4%로서 평균 오차는 13.0%를 나타내었다. 또 침투유량의 경우도 표 6과 같이 기존의 방법보다 간접추정법의 경우가 모두 우월한 결과를 나타내었는데 각각의 상대오차는 기존 방법의 경우 53.6~73.8%로서 평균치 65.8%였으며, 간접추정방법을 적용한 경우 31.0~58.8%로 평균치 45.5%를 나타내었다. 또한, 유출량과 침투유량의 결과를 비교 분석한 경우, 전반적으로 침투유량이 유출량의 모의 예측치 오차보다 기존의 추정방법과 간접추정법을 적용한 경우 모두 월등히 높게 나타났는데, 이것은 침투유량의 예측이 대개 유출량의 예측보다 훨씬 어려움을 나타낸다고 볼 수 있다. 이러한 결과들을 통해서 간접추정법의 적용성 또한 침투유량의 예측 보다 유출량의 예측에 더 있음을 알 수 있었으며 검정을 통한 침투유량의 예측치 오차감소가 요구되어진다. 그림 6과 7은 선택된 두 강우사상의 기록치에 대한 기존의 방법과 간접추정법에 의해 도출된 수문곡선들의 비교분석도이다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 두 강우 모두 기존의 방법에 의해 도출된 수문곡선에 비하여 간접추정법에 의한 수문곡선이 좀 더 관측수문곡선에 대하여 유사한 형태를 나타내었다. 침투발생시간은 기존의 방법과 제안된 방법에 의한 모의결과 모두 실제 발생시간보다 지연되어 발생하였으나, 대체적으로 제안방법의 침투발생시간 오차가 기존의 방법에 의한 오차보다 적은 것으로 나타났다.

표 5. 유출용적의 비교

강우사상	유출량 (m ³)		상대오차 (%)	
	기존방법	제안방법	기존방법	제안방법
Oct. 21, 94	1933.5	2525.1	36.6	17.1
Nov. 04, 94	1388.1	1768.6	26.4	6.2
Jan. 02, 95	551.7	697.3	29.8	11.3
Jan. 04, 95	2824.8	3755.4	11.7	-17.4
평균	-	-	26.1	13.0*

*평균절대상대오차 (mean absolute relative error)

표 6. 침투유량의 비교

강우사상	침투유량 (m ³ /s)		상대오차 (%)	
	기존방법	제안방법	기존방법	제안방법
Oct. 21, 94	0.212	0.299	70.8	58.8
Nov. 04, 94	0.394	0.586	53.6	31.0
Jan. 02, 95	0.134	0.261	73.8	49.0
Jan. 04, 95	0.536	0.869	64.9	43.2
평균	-	-	65.8	45.5

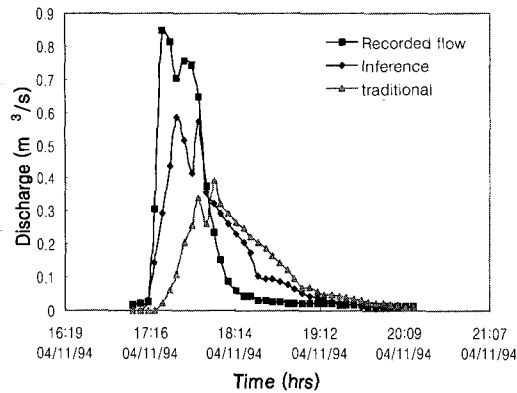


그림 6. 수문곡선 비교분석도 (Nov. 4, 94 호우)

위의 결과들로부터 본 연구에서 제안한 방법은 기존의 매개변수 추정방법의 모델 예측 신뢰도를 훨씬 향상시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 또한 추론모델을 통한 매개변수의 간접추정으로 공간변수추정에 필요한 상당한 유역정보의 감소로 모의를 위한 정보구축에 드는 시간과 경제적 노력을 최소화 할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 유역의 모델변수 추정의 정확성을 높이고 이에 따른 모델의 신뢰도를 높이기 위하여 새로운 매개변수 추정법을 소개하였다. 강우-유출 모의에 주요한 영향을 미치는 토지이용인자를 주요소로 하여 유도된 추론모델을 통해 매개변수를 추정하는 간접추정법은 주로 도시유출에 상당한 영향을 미치는 불투수 지역의 모의에 필요한 매개변수들의 추정에 중점을 두고 있다. 또한 간접추정법의 모델검정 적용에 있어서 지리정보시스템을 이용하여 추론모델에 필요한 유역내의 지형특성인자 추출을 기하하므로써 모델변수 추정의 효과를 극대화하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과들은 미계측 유역 및 계측유역의 공간변수 추정에 간접추정법의 적용성을 입증하였다. 간접추정법과 기존의 추정방법에 의해 얻어진 결과들을 비교한 결과 간접추정법을 사용하였을 경우 모델의 유출량 및 침투유량 예측치의 신뢰도가 모두 향상함을 볼 수 있었다. 이 뿐만 아니라 간접추정법의 경우 기존의 각 소유역별 변수의 직접적인 추정을 지양하고 각 토지이용별 변수만을 지정해줌으로서 보다 효과적이고 효율적인 공간변수추정을 획득할 수 있음은 물론, 이로 인해 추정해야 할 매개변수들의 수

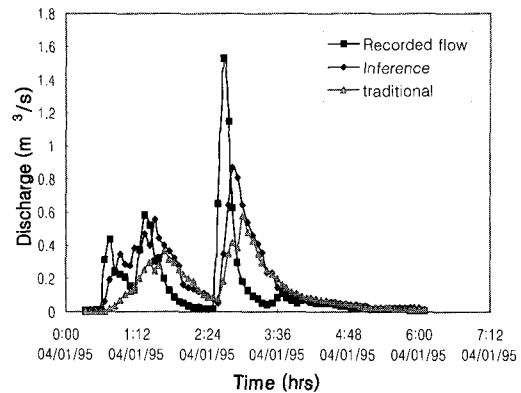


그림 7. 수문곡선 비교분석도 (Jan. 4, 95 호우)

를 상당히 감소시킴으로서, SWMM과 같은 분포형 모델에 입력하여야 할 상당한 수의 공간적 변수들의 추정에 드는 엄청난 시간적 경제적 노력을 최소화 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 간접추정법은 미계측 유역의 변수추정 및 모델검정에 사용할 만한 충분한 자료들을 가지고 있지 않은 계측유역의 모델변수추정의 신뢰도를 높이는 데 유용할 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

- Abustan, I. (1997). *Modelling of phosphorus transport in urban stormwater runoff*, Ph.D. Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering. University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Baffaut, C. and Delleur, J. W. (1989). Expert system for calibrating SWMM. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 278-298.
- Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). *Storm Water Management Model, Version 4, Users Manual*. EPA-600/3-88-001a, U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, USA.
- Ibrahim, Y. and Liang, S.Y. (1992). Calibration strategy for urban catchment parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 11, pp. 1550-1570.
- Liang, S.Y., Chan, W.T. and Lum, L.H. (1991).

- Knowledge based system for SWMM runoff component calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 507-524.
- Pilgrim, D. H. (1987). *Australia rainfall and runoff: a guide to flood estimation*. editor-in-chief, Pilgrim, D. H. 3rd ed. Barton, ACT, Institution of Engineering.
- Zaghloul, N. A. (1981). Sensitivity analysis of the SWMM RUNOFF-TRANSPORT parameters and the effects of catchment discretisation. *International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA, pp. 25-34.
- Zaman, S. (1993). *Simulation of small events in salt pan creek catchment*, Master of Engineering Science Thesis, School of Civil Engineering, The University of New South Wales. Australia.
- (논문번호:03-58/접수:2003.07.09/심사완료:2003.08.06)