미호천 유역의 장기유출 예측을 위한 개념적 강우유출모형의 적용

A Sturdy on Rainfall Runoff Models for Forecast of Long-Term Runoff in Miho Basin

안상억*, 이효상**, 전민우***

Sangeok Ahn, Hyosang Lee, Minwoo Jeon

요 지

최근 기후변화 등으로 우리나라의 경우 강수일수는 감소한 반면 집중호우의 발생빈도는 증가하고 있다. 실제 가뭄과 홍수와 같은 극치사상의 피해가 증가될 가능성과 이러한 재해로부터 인명 및 재산을 보호하고 효율적인 수자원 활용을 위해서는 장기간 강우-유출과정의 정확한 해석이 필수적이다. 본 연구는 미호천 유역을 대상으로 장기유출을 모의하기 위해 개념적 강우유출모형을 적용하였다. 본 연구의 개념적 강우유출모형은 PDM(Probability Distributed Model)으로 유역을 한 개의 단위구역으로 사용한 집중형(lumped) 모형이고, 분포형 모형에 비하여 간단(parsimonious)하며 영국의 수자원 및 홍수 관리 목적으로 널리 사용되고 있다. 모형의 검정은 MC(Monte Carlo) 방법과 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 방법을 적용하였으며, *NSE*(Nash Sutcliffe Efficiency) 목적함수를 사용하여 모형의 성능을 검토하였다. 그 결과, MC 방법과 SCE-UA 방법 모두 *NSE*의 값 0.9 이상으로 만족할 만한 모의성능을 나타내었다. 분포형 모형에 비하여 적은 수문자료 및 검정변수를 갖는 PDM 모형을 수문자료의 취득이 용이하지 않은 중·소규모 유역에 적용하여 모형의 검정 및 유량산정에 있어 우수함을 확인하였다. 이에 우리나라 전역에 걸쳐 다양한 유역을 대상으로 PDM 모형의 검토가 요구되고, 향후 우리나라의 홍수량 산정 및 수자원 관리에 적용될 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 강우유출모형, 장기유출, PDM

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 강수량, 증발산량, 온도 등의 변화는 지구의 물 순환 과정에 광범위한 영향을 미칠 뿐만 아니라 수자원의 수요 및 공급에도 영향을 미칠 것으로 알려지고 있다(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). 실례로 우리나라 6대 도시(서울, 부산, 인천, 강릉, 대구, 목포)의 경우 평균 기온은 1990년 이후 1.5℃ 상승하였고, 최근 50년간의 강수일수는 감소하였지만 일강수량이 80mm 이상인 호우일수의 발생빈도는 증가되고 있다. 이는 1994~1995년, 2000~2001의 가뭄과 태풍 루사(2002년), 매미(2003년), 에위니아(2006년), 나리(2007년), 갈매기(2008년) 등의 홍수에서 볼 수 있듯이 우리나라에 직접적인 영향을 가져왔다. 실제 극치 사상의

* 정회원·충북대학교 토목공학과 석사과정·E-mail : sangeokahn@chungbuk.ac.kr
** 정회원·충북대학교 토목공학과 전임강사·E-mail : hyosanglee@chungbuk.ac.kr
*** 정회원·충북대학교 토목공학과 교수·E-mail : minwoo@chungbuk.ac.kr

발생빈도와 강도가 동시에 증가될 가능성과 이러한 재해로부터 인명 및 재산의 피해를 보호하고 효율적인 수자원 관리 및 활용을 위해서는 장기간 강우-유출과정의 정확한 해석이 필수적이다. 본 연구에서는 충북 미호천 유역을 대상으로 장기유출을 모의하기 위해 최소한의 일 단위 수문자료(강수량, 유량, 온도, 증발산량)를 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS; Water Management Information System)에서 수집하여 매개변수 개수가 적은 개념적 강우유출모형을 적용하였다. 매개변수 추정방법인 MC(Monte Carlo) 방법과 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 방법을 적용하여 모형을 검정하였으며, *NSE*(Nash Sutcliffe Efficiency) 목적함수(objective function)를 활용하여 모형의 성능을 검토하였다.

2. Probability Distribution Model(PDM)

유역의 수문학적인 작용을 고려하기 위하여 Moore(1985)의 확률분포모형(PDM)이 적용되었다. 이 모형은 유역에서 공간적 분포의 토양 수분 저장(soil moisture storage) 용량을 확률분포로 개념화한 모형이고, 그림 1과 같다(S_k는 유역의 수분 저장 용량, $cmax$는 유역의 최대 토양 수분 저장 용량, c_k는 유역의 저장 용량, r_k는 강수량, ae_k는 실제 증발산량, u_k는 유효 강우량). 토양 수분 저장 용량이 유역 전역에 걸쳐 다양하게 나타나고 시간에 따라 포화된 유역의 분포도 변화 가능하며, 이러한 시간에 따른 유역의 토양 수분 저장 용량의 분포는 다음 식 (1)과 같은 파레토 함수(pareto distribution function)로 표현된다.

$$F(c) = 1 - (1 - \frac{c}{cmax})^b, \ 0 \le c \le cmax \tag{1}$$

여기서 c는 토양 수분 저장 용량, b는 유역의 토양 수분 저장 용량의 공간적 변화이고, b값이 1이 된다면 토양 수분 저장 용량이 유역에 걸쳐 균등하게 분포하며, b값이 0과 같으면 토양 수분 저장 용량은 일정한 값을 갖는다.

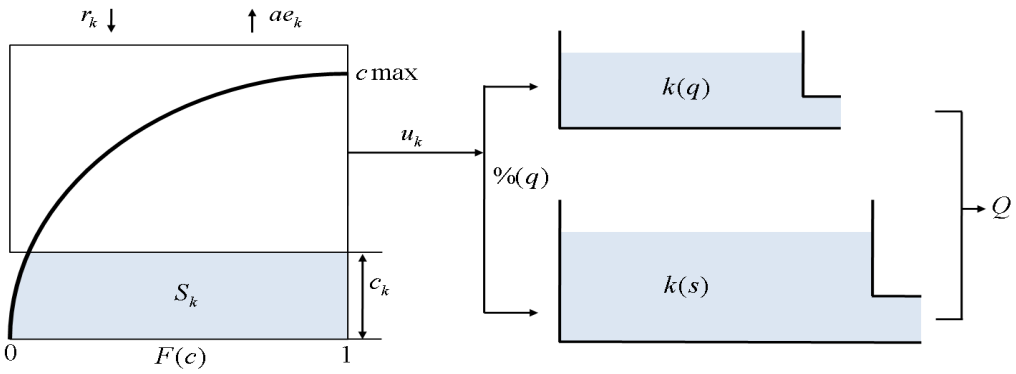

그림 1. Probability Distribution Model

확률분포모형에서 발생된 유효 강우량은 일 강우유출모형에서 적합하게 사용되고 병렬로 연결된 2개의 선형 저류지 루팅에 적용되고, 그림 1과 같다(Jakeman et al., 1990). 선형 저류지 함수(storage function)와 물질 수지(mass balance)를 조합한 유입량과 유출량의 관계로 표현된 저류지 함수 식 (2)가 사용되었다.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{T}[u_k(t) - Q(t)] \tag{2}$$

여기서, Q는 유출 유량이다.

병렬로 연결된 2개의 저류지는 유역의 빠른 반응을 형상화한 것과 느린 반응을 형상화한 것이다. 모든 유효 강우량은 빠른 반응 저류지로 가는 양을 나타내는 $\%(q)$변수를 통해 2개의 저류지로 나누어진다. 각 저류지에서 체류 시간 변수 $k(q)$와 $k(s)$를 통해서 유출 유량으로 연결된다.

3. 강우유출모형의 적용

3.1 미호천 유역

대상유역은 미호천 유역으로서 이 유역은 금강 유역의 북쪽 중앙부에 위치하고 있으며 유역의 북쪽 및 동쪽은 한강 유역, 북서쪽은 안성·삽교천 유역, 남쪽은 금강 잔유지역과 접하고 있으며, 그 유역면적은 1854.98㎢로서 금강 전 유역면적(9914.01㎢)의 18.7%를 차지하고, 미호천의 유로연장은 80.17km이다. 사계절이 뚜렷한 온대 대륙성 기후로 여름에는 고온 다습한 남동풍이나 남서풍이 불며, 겨울에는 한랭 건조한 북서풍이 부는 건기와 우기가 뚜렷한 기후현상을 보이고 있다. 다른 지역에 비해 한서의 차가 비교적 심한 편이나 우리나라의 평균기온인 11℃에 비해 12.7℃로 비교적 기상여건이 양호하며 강수량은 연평균 1,200mm이상으로 6~9월에 집중적으로 비가 내린다.

3.2 PDM의 적용

국가 수자원관리종합정보 시스템(WAMIS)에서 실시간으로 제공하는 자료부터 구축한 모든 강우 입력 자료를 PDM 모형에 MC 방법과 SCE-UA 방법을 적용하였다. 10,000개의 모형 매개변수를 표 1에서 주어진 범위에서 무작위로 추출하여 PDM 모형의 성능을 목적함수로 검토하였다. 목적함수에는 Nash Sutcliffe Efficiency(NSE^*)가 사용되었으며, 식 (3)과 같다.

$$NSE^* = 1.0 - NSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(o_i - c_i(\theta))^2}{\sum_{i=1}^{N}(o_i - \overline{o})^2} \tag{3}$$

여기서 $c_i(\theta)$는 i에 모형 변수 세트 θ로 모의된 유량, o_i는 i에 관측된 유량, NSE^*는 0에 가까울수록 더 나은 모델 성능을 보여준다.

모형의 검정기간은 1992년 1월 1일부터 1996년 12월 31일까지, 검증기간은 1997년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 사용되었으며, 각각의 경우에 대해 초기 20%는 초기 조건의 영향이 크다고 판단되어 검정 및 검증에 고려하지 않았다.

표 1. PDM 모형 매개변수의 범위

Parameters	Description	Range
cmax	Maximum storage capacity of the catchment	0-500 (mm)
b	Degree of spatial variability of storage capacity in the catchment	0-4 (-)
k(q)	Residence time quick flow reservoir	1-5 (dt)
k(s)	Residence time slow flow reservoir	15-400 (dt)
%(q)	Percentage flow through quick flow	0.5-1 (-)

4. 결과

4.1 MC 방법

MC방법을 이용한 PDM 모형의 검정기간에 대한 최적의 유량곡선은 그림 2와 같다. 점선은 모의된 유량, 회색부분은 관측된 유량을 나타내고, 유량곡선에 대한 목적함수 NSE^{*}= 0.034으로 우수한 모형 모의성능을 확인할 수 있다. 하지만, 첨두유량의 부분은 저평가되고 있다. 검정기간의 모형 매개변수를 검증기간에 적용한 결과도 전체적으로 모의성능이 우수하였다(NSE^{*}= 0.051).

그림 3은 MC 방법에 의해 모의한 10,000개의 매개변수들의 목적함수 결과에 따른 사후반응표면(posterior response surface)을 나타낸 것으로 매개변수의 주어진 범위 안에서 목적함수로 검토한 결과를 보여주고 있다. 가로축은 매개변수의 범위, 세로축은 모형의 성능을 나타내는 목적함수 값을 나타낸 것이며, 가장 우수한 모의 성능을 보인 매개변수는 사각형(■)으로 표시하였고, 점(●)는 각 매개변수의 모형 성능을 보여주고 있다.

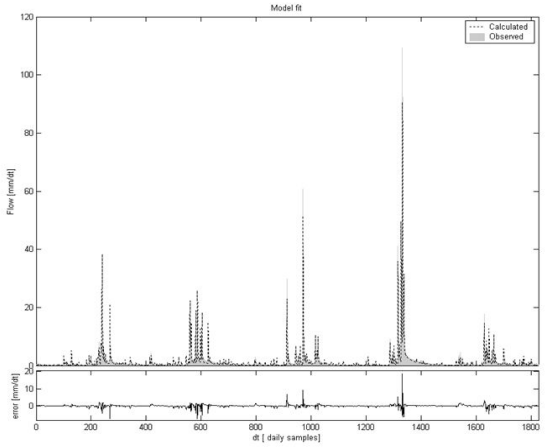

그림 2. MC 방법에 의한 유량곡선

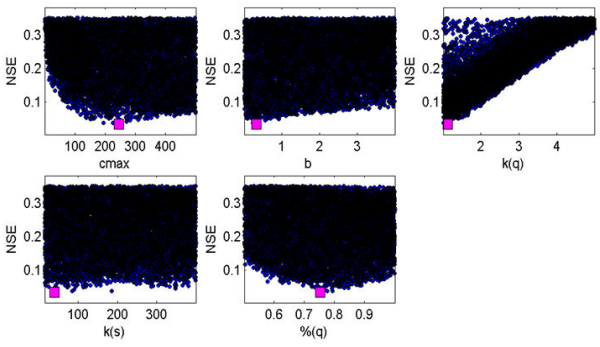

그림 3. MC방법의 매개변수 결과

4.2 SCE-UA 방법

MC 방법과 동일한 검정기간 동안 SCE-UA방법을 이용한 PDM 모형의 모의 성능을 보여주는 유량곡선은 그림 4와 같다. 전체적으로 우수한 모형 모의 성능(NSE^{*}= 0.031)을 확인할 수 있지만, MC 방법과 마찬가지로 첨두유량의 부분은 저평가되는 문제점을 나타내고 있다. 검증기간도 마찬

가지로 전체적인 모의성능이 우수하였다(NSE^*= 0.051).

본 연구에서 SEC-UA의 진화 횟수의 제한 값을 20, 30, 50, 100번 적용하여 분석하였다. 그림 5는 50회에 대한 결과로서 모의한 모형에 대한 매개변수의 최적값을 탐색하는 단계를 표현한 것으로 가로축은 매개변수의 진화수, 세로축은 모형의 매개변수 값을 나타내고 20번 이내에서 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다.

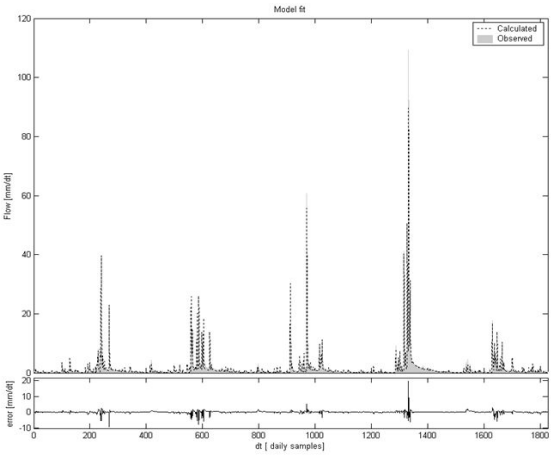

그림 4. SCE-UA 방법에 의한 유량곡선

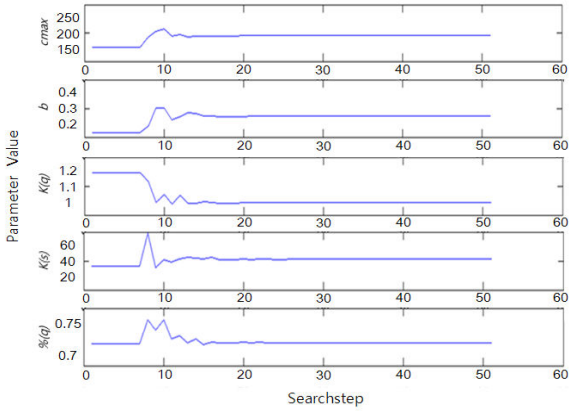

그림 5. SCE-UA의 매개변수결과

5. 결론

본 연구는 PDM 모형을 우리나라 유역에 적용하여 검토하였다. 분포형 모형에 비하여 적은 입력자료 및 검정변수를 갖는 개념적 강우유출모형을 미호천 유역에 적용, 장기유출을 모의하여 우수한 성능을 나타내었다. 첨두유량 산정에서 보인 문제점은 유량곡선의 세부적인 부분에 초점을 맞춘 다양한 목적함수를 적용하여 모형의 모의성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구를 통하여 현재 유역 및 수문자료의 부족으로 강우유출모의의 어려움이 있는 우리나라의 중·소규모 유역 적용에 적합할 것으로 판단되므로 다양한 유역을 대상으로 PDM 모형의 검토가 요구된다. 향후 우리나라의 홍수량 산정 및 수자원 관리에 적용될 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. IPCC (2007). *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
2. Jakeman, A., Littlewood, I., and Whitehead, P. (1990). “Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments." *Journal of Hydrology,* Vol. 117, pp. 275-300.
3. Moore, R. (1985). *The probability-distributed principle and runoff prediction at point and basin scales*. Hydrological Sciences Bulletin, 30(2), 273-297.